

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

АКСЬОМ ПЕТРО АНДРІЙОВИЧ

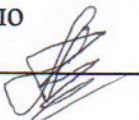
УДК 621.9

ДИСЕРТАЦІЯ
ПОЛПШЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ
ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Спеціальність: 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту»

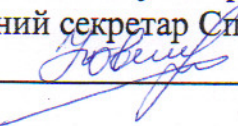
Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 П.А. Аксьом

Науковий керівник –
Посвятенко Едуард Карпович,
доктор технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації засвідчую
Вчений секретар Спеціалізованої вченої ради Д 26.059.03

 С.В. Ковбасенко

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Аксьом П.А. Поліпшення властивостей відновлювальних деталей засобів транспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» – Національний транспортний університет, МОН України, Київ, 2020.

Дисертацію присвячено дослідженню основних напрямків підвищення оброблюваності деталей і поверхонь покриттів виробів засобів транспорту, що виготовляються із аустенітних сталей.

Першим, хто відзначив підвищення оброблюваності пластичних нетермозміцнених сталей попереднім холодним деформуванням був Я.Г. Усачов. Для цього він провів серію точних порівняльних експериментів. На шлях поліпшення оброблюваності, використанням попереднього холодного пластичного деформування, указували у різні часи В.М. Подураєв, О.М. Розенберг, Ю.Г. Проскуряков, Е.Н. Trent, Н.Е. Епафого та інші науковці. У той же час дослідження цих фахівців були фрагментарними, не мали системного характеру і стосувались, головним чином, лише напрямку поліпшення оброблюваності без пояснень суті явища. Крім того вказані дослідження стосувались лише маловуглецевих і низьколегованих сталей. Не відзначалась також роль мастильно–охолоджувальних речовин у поєднанні з холодною пластичною деформацією.

Виходячи із сказаного була сформульована мета дослідження – поліпшення властивостей відновлюваних деталей засобів транспорту, виготовлених із аустенітних сталей, сумісною дією холодного пластичного деформування (ХПД) і екологічно чистих мастильно–охолоджувальних рідин (МОР) рослинного походження при механічній обробці.

Теоретичні засади дослідження показали, що у зоні низьких та середніх швидкостей різання, характерних для обробки складним інструментом із

швидкорізальної сталі (протягування, нарізання різьби, довбання тощо), факторами сильного впливу на оброблюваність аустенітних сталей є попередня обробка останніх холодним пластичним деформуванням та введення у зону різання рослинних мастильно–охолоджувальних рідин. Дещо слабше діє на процес швидкість різання, а інші фактори, у тому числі і передній кут, майже не впливають на оброблюваність у діапазоні досліджуваних факторів.

Роль попереднього холодного пластичного деформування полягає у тому, що при проведенні процесу виконується частина роботи, яку мала б виконати обробка різанням недеформованої аустенітної сталі. Використання середовища рослинного походження поліпшує контактні процеси на передній поверхні інструменту. Отже, в результаті отримуємо подвійний позитивний ефект: з боку зони стружкоутворення через попереднє об'ємне холодне пластичне деформування, а з боку контактної зони – через ефективне екологічно чисте рослинне середовище.

Теоретичні засади дослідження лягли в основу математичної моделі підвищення оброблюваності аустенітних сталей, інтенсифікованих ХПД та дією МОР на рослинній основі. Для перевірки математичної моделі на адекватність було використано експериментальні значення трьох рівнів факторів: ХПД, середовище та швидкість різання. Доведено, що рівняння математичної моделі є адекватним.

У дослідженні використовувались зразки із наступних марок аустенітних сталей: 08X18H10 (AISI 304); 12X15Г9НД (AISI 201); 110Г13Л (A128) та контрольної нержавіючої сталі феритного класу 40X13 (AISI 420). Холодне деформування з деформаціями зразків до 90% здійснювалось на гідравлічному пресі моделі ПММ–200 з використанням запропонованого нами методу поперечного стиску.

Вивчення теорії обробки матеріалів різанням показало, що об'єктивно можна судити про оброблюваність того чи іншого матеріалу по коефіцієнту усадки стружки ξ і повній довжині контакту останньої с з передньою поверхнею

інструменту. При цьому зменшення величини цих факторів однозначно свідчить про поліпшення оброблюваності матеріалу різанням.

Для вивчення сумісного впливу деформаційного зміцнення і екологічно чистих мастильно–охолоджувальних речовин на оброблюваність аустенітних сталей характерних марок була проведена серія експериментів за схемою вільного прямокутного різання на фрезерному верстаті.

Різець зі сталі Р6М5 затискався у патроні верстату, а зразок, установлений у лещатах, подавався на різець переміщенням столу. Геометричні параметри різця були наступними: ширина 10 мм, передній кут 15° , задній кут 6° , радіус округлення різальної кромки – 10 мкм. Швидкість різання – 26,5 м/год. Товщина зрізуваного шару 0,02 – 0,03 мм.

Експерименти по визначенню оптимальної марки МОР включали дослідження впливу сульфозфрезулу Р, ріпакової та соняшникової олій, а також олії льону на величини ζ та c при різанні незміцнених та зміцнених деформацією сталей. Для порівняння процес проводився також без мастила.

Порівняння олій з найпоширенішим традиційним для процесів різання сульфозфрезолом Р дало наступні результати. Сумісна дія холодного пластичного деформування і середовища при різанні аустенітної сталі 12Х15Г9НД знижує коефіцієнт усадки стружки на 25%, а повної довжини контакту – на 34%. При обробці аустенітної сталі 08Х18Н10 ці показники відповідно такі: зниження ζ на 24%, а c – на 34%. Обробка зносостійкої аустенітної сталі 110Г13Л характеризується наступними результатами: зменшення коефіцієнта усадки стружки на 16%, а повної довжини контакту – на 22%. Різання контрольної марки феритної нержавіючої сталі 40Х13 також показало поліпшення оброблюваності: ζ на 21% і c на 29%.

Отже, попереднє холодне пластичне деформування у поєднанні з використанням мастильно–охолоджувальних рідин на рослинній основі є потужним засобом поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей.

Аналіз результатів експериментів показує також, що всі види олій дають приблизно однакові результати щодо поліпшення оброблюваності аустенітних

сталей. Тому у подальшому, керуючись вартістю олій, вибрано найдешевшу – ріпакову.

Проведено серію точних експериментів із застосуванням електронної мікроскопії за допомогою мікроскопа РЕМ–106И. Метою цих експериментів було виявлення впливу об'ємного ХПД на густину дислокацій у аустенітних сталях.

Отримані фотографії оброблювалися за допомогою комп'ютерної програми та вираховувалась фактична кількість дислокацій на одиницю площі. Потім пропорційно вираховувалася густина дислокацій для більшої площі металу.

Обробка мікрошліфів показала, що густина дислокацій ρ в результаті обробки зразків об'ємним ХПД збільшується приблизно у 4 рази.

Скупчення дислокацій служить основою для формування мікротріщин у матеріалі, що сприяє поліпшенню оброблюваності різанням аустенітних сталей.

Установлено, що поліпшення оброблюваності аустенітних сталей відбувається також завдяки перетворенням аустеніту в мартенсит, тобто набуття парамагнітною сталлю феромагнітних властивостей.

Визначення фазового складу при аустенітно–мартенситних перетвореннях, викликаних дією холодної пластичної деформації проводилось з використанням рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima IV. Прилад дозволяє визначити: кількісний та якісний фазовий склад досліджуваного матеріалу, період кристалічної ґратки, розмір областей когерентного розсіяння, ступінь деформації кристалічної ґратки, величину залишкових макронапружень методом $\sin^2\psi$, кристалографічну орієнтацію кристалів, ступінь кристалічності.

Метод аналізу – рентгеноструктурний фазовий. Дослідження зразків проведено в мідному випромінюванні ($\text{Cu}_{\text{K}\alpha} = 0,15418 \text{ нм}$). Напруга – 30 кВ; сила струму – 30 мА; ширина щілини, яка обмежує рентгенівський промінь – 10 мм. Для дослідження використано схему фокусування за Брегом–Брентано. Умови досліджень: досліджений інтервал кутів $2\Theta = 25\text{--}140^\circ$, крок зйомки – $0,04^\circ$, час витримки у точці – 2 с; тривалість зйомки одного зразка – 90 хв.

Аналіз отриманих рентгенівських спектрів та проведення кількісного та якісного фазового аналізу здійснено з використанням програмного забезпечення PDXL, міжнародної бази даних дифракції ICDD (PDF-2) та відкритої бази кристалографічних даних COD.

Установлено, що попередня обробка аустенітних сталей ХПД за методом поперечного стиску викликає зниження середньої температури різання, яку виміряно методом природної термопари, на 30–50 °С.

Дослідження складових P_z і P_y сили різання було проведено за допомогою стандартного тензометричного динамометра УДМ-600. Ці дослідження показали зниження складових у середньому на 25–30% при сумісній дії ХПД і ріпакової олії.

Про суттєве поліпшення оброблюваності аустенітних сталей свідчать також зміна контактних характеристик процесу різання: нормальних напружень (тиску) q_N , дотичних напружень q_K та середнього коефіцієнту тертя μ .

Дослідження показали, що протягом усього циклу обробки на низьких та середніх швидкостях різання тіло наросту має стабільну форму і перебуває у зоні дії виключно пружних деформацій. Наріст є додатковим різальним клином, який генерує система, що адаптується до характерних умов процесу. Позитивна функція наросту полягає у захисті різальної кромки інструменту і розміщення лунки зношування на передній грані на деякій відстані від цієї кромки. Негативна функція наросту полягає у значному погіршенні оброблюваної поверхні деталі через періодичне видалення його твердих часток з боку задньої поверхні. Відмінність процесів наростоутворення при різанні незміцненого і зміцненого металу полягає у розмірах і об'ємі тіл наросту. Основними геометричними характеристиками наросту є: радіус округлення ρ_H , передній кут γ_H , довжина підосви s_H та площа тіла S_H .

Дія попереднього ХПД та екологічно чистої МОР рослинного походження дозволяє у кілька разів знизити характеристики наросту. Тим самим напружено-деформівний стан системи «оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал – стружка» максимально наближається до початкового (заданого). Зона

пластичного контакту стружки з передньою поверхнею зменшується. Параметри різального клину набувають значень, близьких до створюваних заточуванням. Шорсткість обробленої поверхні поліпшується за параметром R_z у 5–20 разів.

Побудовано відповідно до розробленої математичної моделі підвищення оброблюваності аустенітних сталей взаємозв'язок явищ при різанні цих сталей, попередньо зміцнених ХПД, в умовах екологічно чистих МОР.

Вплив ХПД на зміну твердості аустенітних сталей полягає у наступному. Зміна твердості діє на складові P_z і P_y , температуру різання Θ і коефіцієнт усадки стружки ζ . Виконуючи частину роботи різання, попереднє ХПД знижує величину P_z та P_y , що, у свою чергу, знижує величину q_N , q_F і коефіцієнт тертя μ у зоні контакту. Попереднє ХПД також знижує інтенсивність наростоутворення.

Зниження коефіцієнта усадки стружки ζ також призводить до зниження її товщини, тобто зменшення радіуса завитка стружки і, як наслідок, підвищення коефіцієнта заповнення канавок $1/k$ при різанні інструментом із примусовим формуванням валика стружки. Для різальних протяжок така зміна може складати від $1/k = 0,21$ до $1/k = 0,63$, тобто збільшуватись у 2–3 рази. Збільшується відповідно і допустима довжина протягування.

Вплив МОР на параметри процесу різання полягають у наступному. Використання ріпакової олії дає зниження коефіцієнта тертя μ та коефіцієнта усадки стружки ζ на 30% та 80% відповідно.

Зміна швидкості різання в межах 5 – 50 м/хв в поєднанні з попереднім ХПД та МОР дозволяє керувати явищем наростоутворення.

Сумісна дія вищезгаданих факторів дозволяє суттєво підвищити оброблюваність аустенітних сталей, для яких складність обробки різанням лезовим інструментом із швидкорізальної сталі є звичним явищем. Особливо це стосується протягування.

Дослідження залишкових напружень першого роду за методом М.М. Давиденкова показало, що зняття таких напружень, поведінку яких при обробці аустенітних сталей важко прогнозувати, показало, що ХПД є ефективним методом зменшення чи повного зняття цих напружень.

Завершальною (фінішною) термічною обробкою деталей транспортних засобів, метою якої є повернення потрібних експлуатаційних властивостей, вибрано середній відпуск. Призначення цієї операції – зняти повністю залишкові напруження, які виникли у деталях у попередніх операціях; змінити фізико–механічні властивості матеріалу (підвищити пластичність та ударну в’язкість при незмінній границі текучості; дещо знизити твердість і тимчасовий опір); перетворити різні структурні складові знову у аустеніт. Середній відпуск виконується у діапазоні температур 300–350° С при витримці 1,5 – 2 години у захищеному аргоні середовищі.

Таким чином, для виробництва та відновлення деталей транспортних засобів із аустенітних сталей на основі результатів дисертаційного дослідження рекомендується наступна схема основних технологічних операцій: холодне об’ємне пластичне деформування – формоутворююча обробка різанням у середовищі екологічно чистих МОР на основі ріпакового масла – середній відпуск у захисному аргоні середовищі. При необхідності (для точних деталей) слід рекомендувати фінішну алмазно–абразивну обробку за рекомендаціями Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України.

Схема основних технологічних операцій покладена в основу технічного рішення – патент України № 118017. Результати дисертаційної роботи використані у навчальних дисциплінах кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства Національного транспортного університету: «Технологія конструкційних матеріалів» та «Основи інженерії поверхні деталей машин та конструкцій», а також на 2–х машинобудівних підприємствах: ТДВ «Мукачівський машинобудівний завод» (м. Мукачево) і ДП «Завод ім. В.О. Малишева» (м. Харків).

Ключові слова: холодне пластичне деформування, аустенітні сталі, мастильно–охолоджувальні рідини, протягування, метод поперечного стискання, мікроструктура, дислокації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Видання, які входять до наукометричних баз:

1. Influence a material and the technological factors on improvement of operation properties of machine parts by reliefs and film coatings / E. Posviatenko, N. Posviatenko, R. Budyak, L. Shvets, Ju. Paladiichuk, P. Aksom, I. Rybak, B. Sabadash, V. Hryhoryshen. Eastern–European journal of enterprise technologies. 2018. № 5/12 (95). P. 48–56.

Фахові видання:

2. Посвятенко Е. К. Особливості обробки деталей засобів транспорту із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2015. – Вип. 1 (31). – С. 443 – 449.

3. Посвятенко Е. К. Відновлення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2015. – Вип. 2 (32). – С. 210 – 218.

4. Посвятенко Е. К. Основні напрямки поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2016. – Вип. 1 (34). – С. 370 – 377.

5. Посвятенко Е. К. Розробка наукових основ поліпшення оброблюваності деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Частина 1: Серія: “Технічні науки”. Науковий журнал. – К.: НТУ, 2016. – Випуск 18. – С. 94 – 100.

6. Посвятенко Е. К. Вплив попередньої холодної деформації і рослинних мастильно–охолоджуючих рідин на фізико–механічні та технологічні властивості аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Н. І. Посвятенко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – С. 172 – 178.

7. Посвятенко Е. К., Аксьом П. А. Про природу впливу деформаційного зміцнення на оброблюваність аустенітних сталей. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2019. – Вип. 3 (45). – С. 113 – 121.

Публікації у зарубіжних виданнях:

8. Посвятенко Е. К. Поліпшення властивостей аустенітних сталей як конструкційного матеріалу / Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 6 seria: Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2015, s. 113 – 118.

Патенти:

9. Пат. 118017 Україна, МПК (2017.01) C21D 8/00. Спосіб оброблення аустенітних сталей / Посвятенко Е. К., Аксьом П. А. Власник Національний транспортний університет. – № а 2016 08413; заявл. 01.08.2016; опубл. 25.07.2017. Бюл. № 14.

Публікації апробаційного характеру:

10. Посвятенко Е. К. Підвищення оброблюваності аустенітних сталей різанням / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Ю. В. Драгун // Тези доповідей LXX наукова конференція професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2014. – С. 9 – 10.

11. Посвятенко Е. К. Основний напрямок підвищення оброблюваності аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 14–го Международного научно–технического семинара, 24–28 февраля 2014г., г. Свалява. – Киев: АТМ Украины, 2014. – С. 189 – 192.

12. Посвятенко Е. К. Нова технологія виготовлення та ремонту деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Тези доповідей LXXI наукова конференція професорсько–викладацького складу,

аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2015. – С. 9.

13. Посвятенко Е. К. Аустенітні сталі у транспортному машинобудуванні / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // 12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів–механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2015. – С. 121 – 122.

14. Посвятенко Е. К. Зміна властивостей аустенітних сталей холодним пластичним деформуванням / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Тези доповідей III-ї міжнародної інтернет–конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій», 23 грудня 2015 року: збірник наукових праць. Частина 1 / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інші]. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – С. 37.

15. Аксьом П. А. Новий метод обробки аустенітних сталей при виготовленні і відновленні деталей транспортних засобів / П. А. Аксьом // Тези доповідей LXXII наукова конференція професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2016. – С. 9.

16. Посвятенко Е. К. Математична модель обробки деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 16-й Международной научно–практической конференции, 20 – 23 сентября 2016 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2016. – С. 122 – 126.

17. Аксьом П. А. Дослідження холодного пластичного деформування методом поперечного стискання / П. А. Аксьом // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатація машинобудівних конструкцій: Матеріали конференції. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2016. – С. 16 – 17.

18. Посвятенко Е. К. Про вплив дислокацій на фізико–механічні властивості феритних та аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, О. В. Мельник // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на

- транспорте: Матеріали 17-го Міжнародного научно-технічного семінара, 20–24 лютого 2017 г., г. Сваліява. – Київ: АТМ України, 2017. – С. 239 – 241.
19. Аксьом П. А. Вплив середовища на оброблюваність деталей транспорту із аустенітних сталей / П. А. Аксьом // Тези доповідей LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2017. – С. 15.
20. Посвятенко Е. К. Визначення фактичного складу аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // 13-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2017. – С. 187 – 188.
21. Посвятенко Е. К. Про фізичну природу поліпшення оброблюваності аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Инженерия поверхности и реновация изделий: Матеріали 17-й Міжнародной научно-практической конференции, 29 мая – 02 июня 2017 г., г. Одесса. – Київ: АТМ України, 2017. – С. 48 – 53.
22. Аксьом П. А. До аналізу складових металевого матеріалу / П. А. Аксьом, Е. К. Посвятенко, О. В. Мельник // Тези доповідей LXXIV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2018. – С. 13.
23. Аксьом П. А. Структурні перетворення у аустенітних сталях при холодному пластичному деформуванні / П. А. Аксьом, Е. К. Посвятенко // Тези доповідей LXXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2019. – С. 9
24. Посвятенко Е. К. Поліпшення оброблюваності різанням пластичних матеріалів / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // 14-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2019. – С. 163 – 164.

SUMMARY

Aksom P.A. Improvement of the properties of renewable parts of vehicles. – Qualifying scientific paper on the rights of the manuscript.

Thesis for a candidate degree in technical sciences in speciality 05.22.20 “Maintenance and Repair for Transport Vehicle”. – National Transport University, Ministry of Science and Education of Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the study of the main directions of increasing the workability of parts and surface coatings of vehicles made from austenitic steels.

The first one who noted the increase in the workability of plastic non-thermosettingly reinforced steels by the previous cold deformation was Ya.G. Usachov. To do this, he conducted a series of precise comparative experiments. On the way of improvement of the workability, using the previous cold plastic deformation, indicated at different times V. M. Poduraiev, O. M. Rosenberg, Yu. G. Proskuriakov, E. N. Trent, H. E. Enahoro and other scholars. At the same time, the research of these specialists was fragmentary, not of a systemic nature, and concerned, mainly, only the direction of improving workability without explaining the essence of the phenomenon. In addition, the indicated studies concerned only low-carbon and low-alloy steels. There was no difference in the role of lubricant-coolant substances in combination with cold plastic deformation.

Proceeding from the aforesaid, the purpose of the study was formulated – the improvement of the properties of renewable parts of vehicles, made of austenitic steels, the joint action of cold plastic deformation (CPD) and environmentally friendly phytogenic lubricant-coolant liquids (LCLs) in mechanical processing.

The theoretical foundations of the study have shown that in the zone of low and medium cutting speeds typical of the processing of a complex tool with high-speed steel (tempering, thread cutting, slotting, etc.), the factors of a strong influence on the working ability of austenitic steels is the preliminary treatment of the latter by cold plastic deformation and introduction into the cutting zone of vegetative lubricat-coolant liquids. The process of cutting speed is somewhat weaker, and other factors,

including the front angle, almost do not affect the workability of the range of investigated factors.

The role of the previous cold plastic deformation consists in the fact that during the process of carrying out a part of the work that would have to be done by cutting unstrained austenitic steel. The use of a herbal environment improves contact processes on the front surface of the instrument. So, as a result, we get a double positive effect: from the side of the chip formation zone through the previous volumetric cold plastic deformation, and from the contact zone – through an effective environmentally friendly plant environment.

The theoretical basis of the research laid the basis for a mathematical model for improving the processing of austenitic steels, intensified cold plastic deformations (CPD) and the effect of lubricant–coolant liquids (LCLs) on a vegetative basis. To test the mathematical model for adequacy were used the experimental values of the three levels of factors: cold plastic deformation (CPD), medium environment, and cutting speed. It is proved that the mathematical model equation is adequate.

The study used samples from the following grades of austenitic steels: AISI 304; AISI 201; A128 and control stainless steel ferrite grade AISI 420. Cold deformation with deformation of samples up to 90% was carried out on the hydraulic press of the IIMM–200 model using our proposed method of transverse compression.

The study of the theory of machining materials by cutting showed that it is objectively possible to judge the machinability of a material on the chip reduction coefficient ζ and the total length of the contact of the latter c with the front surface of the tool. At the same time, the decrease in the magnitude of these factors unambiguously indicates an improvement in the workability of the material by cutting.

To study the joint effect of strain hardening and environmentally friendly lubricat–coolant materials on the processing of austenitic steels of characteristic grades, a series of experiments was conducted on the scheme of free rectangular cutting on a milling machine.

The P6M5 steel cutter was clipped in the cartridge of the machine, and the sample, mounted in the jaw vise, was applied to the cutter by moving the table. The

geometric parameters of the cutter were as follows: width 10 mm, cutting angle 15° , outside angle 6° , radius of rounding of the cutting edge – 10 μm . Cutting speed – 26.5 m / h. The thickness of the cut layer is 0,02 – 0,03 mm.

Experiments to determine the optimal lubricant–coolant liquids (LCLs) grade included investigations of the influence of sulfoprozole P, rapeseed and sunflower–seed oil, as well as linseed oil on the size of ζ and c while the cutting of non–strengthened and strengthened steels. For comparison, the process was also carried out without lubrication.

Comparison of the oils with the traditional sulfoprofosol P commonly used for the cutting processes yielded the following results. The joint action of cold plastic deformation and the environment during cutting of austenitic steel AISI 201 decreases chip reduction coefficient by 25%, and the total length of contact – by 34%. When processing austenitic steel AISI 304, these indicators are as follows: decrease ζ by 24%, and c – by 34%. Treatment of wear–resistant austenitic steel A128 is characterized by the following results: decrease of chip reduction coefficient by 16%, and the full length of the contact – by 22%. Cutting of the control mark of ferrite stainless steel AISI 420 also showed improved workability: ζ by 21% and c by 29%.

Consequently, the previous cold plastic deformation in combination with the use of vegetable–based lubricat–coolant liquids is a powerful tool for improving the workability of austenitic steel parts.

An analysis of the results of experiments also shows that all types of oils give roughly identical results to improve the workability of austenitic steels. Therefore, in the future, guided by the cost of oils, we selected the cheapest one, rapeseed.

A series of precise experiments was carried out by means of electron microscopy using the PЭМ–106И microscope. The purpose of these experiments was to detect the effect of volumetric cold plastic deformations (CPD) on the density of dislocations in austenitic steels.

The obtained photographs were processed using a computer program and the actual number of dislocations per unit area was calculated. Then, the density of dislocations for a larger area of metal was calculated proportionally.

The microsections treatment showed that the density of dislocations ρ as a result of the processing of samples with bulk cold plastic deformations (CPD) was increased approximately by 4 times.

The accumulation of dislocations serves as the basis for the formation of microcracks in the material, contributes to improved machining by cutting of austenitic steels.

The paper determined that improvement of the austenitic steels workability is also due to the transformations of austenite into martensite, that is, the acquisition of ferromagnetic properties by paramagnetic steel.

The determination of the phase composition during austenitic–martensitic transformations caused by the action of cold plastic deformation was carried out using an X–ray diffractometer Rigaku Ultima IV. The device makes it possible to determine: the quantitative and qualitative phase composition of the investigated material, the period of the crystal lattice, the regions size of coherent scattering, the degree deformation of the crystal lattice, the magnitude of residual macrostress by the $\sin^2\psi$ method, the crystallographic orientation of the crystals, the degree of crystallinity.

The method of analysis is X–ray structural phase. The study of samples was carried out in copper radiation ($\text{Cu}_{\text{K}\alpha} = 0.15418 \text{ nm}$). Voltage – 30 kW; current strength of 30 mA; the width of the gap, which limits the X–ray – 10 mm. The study uses the Bragg–Brentano focusing scheme. Study conditions: the range of angles $2\Theta = 25\text{--}140^\circ$ was studied, the shooting step was $0,04^\circ$, the exposure time at the point – 2 s; the duration of shooting one sample is 90 minutes.

X–ray spectra and quantitative and qualitative phase analysis were analyzed using the PDXL software, the international diffraction database ICDD (PDF–2), and the open source COD crystallographic data.

It was established that preliminary processing of austenitic steels with cold plastic deformations (CPD) by the method of transverse contraction causes a decrease in the average temperature of cutting, which was measured by the method of natural thermocouple, by $30\text{--}50^\circ\text{C}$.

The study of the P_z and P_y components of cutting force was carried out using a standard tensometric dynamometer UDM-600. These studies showed a decrease in components by an average of 25–30% with the combined action of cold plastic deformations (CPD) and rapeseed oil.

A significant improvement in the workability of austenitic steels is also evidenced by the change in the contact characteristics of the cutting process: normal stresses (pressures) q_N , tangential stresses q_K and average friction coefficient μ .

Studies have shown that during the whole cycle of treatment at low and medium cutting speeds, the body of the build-up has a stable shape and is in the operating zone of exclusively elastic deformations. Build-up is additional cutting wedge, which generates a system adapted to the characteristic process conditions. The positive function of the build-up is to protect the cutting edge of the tool and to place the wear hole on the front face at a distance from this edge. The negative function of the build-up is a significant deterioration of working surface of the part through the periodic removal of its solid particles from the back surface. The difference in the processes of build-up formation when cutting untensioned and reinforced metal consists in the size and volume of the bodies of the build-up. The main geometric characteristics of the build-up are: the radius of rounding ρ_H , the front angle γ_H , the length of the sole c_H , and the area of the body S_H .

The action of the previous cold plastic deformations (CPD) and environmentally friendly phytogenic lubricant-coolant liquids (LCLs) can reduce the characteristics of the build-up over several times. Thus, the strained-deformed state of the system "processed material – instrumental material – chip" approaches as much as possible the initial (specified). The area of the plastic contact of the chips with the front surface is reduced. The parameters of the cutting wedge acquire values close to the results achieved by sharpening. The roughness of the treated surface is improved by the parameter R_z 5–20 times.

In accordance with the developed mathematical model of increasing the workability of austenitic steels, the interrelation of phenomena during the cutting of

these steels, pre-reinforced cold plastic deformations (CPD), under conditions of environmentally friendly lubricant-coolant liquids (LCLs) is constructed.

The influence of cold plastic deformations (CPD) on the hardness change of austenitic steels is as follows. The change in hardness affects the components P_z and P_y , the cutting temperature Θ and the chip reduction coefficient ζ . By performing a part of the cutting operation, the preliminary cold plastic deformations (CPD) reduces the value of P_z and P_y , which in turn reduces the value of q_N , q_F and the friction coefficient μ in the contact area. Previous cold plastic deformation (CPD) also reduces the intensity of build-up formation.

The decrease of the chip reduction coefficient ζ also leads to a decrease in its thickness, i.e., a decrease in the curl radius of the chip and, consequently, an increase in the filling factor of the grooves $1/k$ when cutting with a tool forcing the formation of a large chip. For broaching cutters such a change can be from $1/k = 0,21$ to $1/k = 0,63$, that is, it should increase 2–3 times. The acceptable length of broaching is increased accordingly.

The effect of the lubricant-coolant liquids (LCLs) on the parameters of the cutting process is as follows. The use of rapeseed oil reduces the coefficient of friction μ and the chip reduction coefficient ζ by 30% and 80%, respectively.

Changing of the cutting speed in the range of 5 – 50 m/min in combination with the previous cold plastic deformation (CPD) and lubricant-coolant liquids (LCLs) allows you to manage the phenomenon of build-up formation.

The combined effect of the above-mentioned factors allows us to significantly improve the workability of austenitic steels, for which the difficulty of cutting by blade tools with high-speed steel is a common occurrence. This is especially true for broaching.

Investigation of residual stresses of the first kind by the method of M. M. Davydenkov showed that the removal of such stresses, whose behavior in the processing of austenitic steels is difficult to predict, has shown that cold plastic deformation (CPD) is an effective method for reducing or completely removing of these stresses.

A terminal (final) heat treatment of vehicles parts whose purpose is to return the desired operational properties, an average tempering is chosen. The purpose of this operation is to completely remove the residual stresses that arose in details in previous operations; to change the physical and mechanical properties of the material (to increase the plasticity and impact resistance at a constant yielding border, to slightly reduce the stiffness and temporary resistance) and to transform various structural components into austenite again. The average tempering is carried out in the range of temperatures of 300–350°C at an exposure time of 1,5 – 2 hours in a protected argon environment.

Thus, for the production and renewal of vehicles parts from austenitic steels, based on the results of the dissertation research, the following scheme of basic technological operations is recommended: cold volumetric plastic deformation – shaping processing by cutting in environment of environmentally friendly lubricant–coolant liquids (LCLs) based on rapeseed oil – average tempering in protective argon environment. If necessary (for exact details), it is recommended finishing the diamond–abrasive treatment according to the recommendations of the Institute of Superhard Materials named after V.M. Bakul of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The scheme of basic technological operations is the basis of the technical solution – the patent of Ukraine No. 118017. The results of the dissertation were used in the educational disciplines of the Department of Manufacturing, Repair and Materials Engineering of the National Transport University: “Technology of Structural Materials” and “Fundamentals of Surface Engineering of Machine Parts and Structures”, as well as at 2 machine–building enterprises: SLC "Mukachevo Machine Building Plant" (Mukachevo) and SE "Malyshev Plant" (Kharkiv).

Key words: cold plastic deformation, austenitic steels, lubricant–coolant liquids, broaching, transverse compression method, microstructure, dislocations.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	22
ВСТУП	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
1.1. Основні напрямки поліпшення оброблюваності матеріалів	28
1.2. Фізико–механічні властивості аустенітних сталей	31
1.3. Основні області застосування аустенітних сталей у машинобудуванні ...	35
1.4. Відомі способи холодного пластичного деформування у машинобудуванні	38
1.5. Мастильно–охолоджувальні рідини при обробці аустенітних сталей	45
Мета і завдання дослідження	47
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ОБРОБЛЮВАНOSTІ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ І ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	49
2.1. Математична модель процесу різання аустенітних сталей, інтенсифікованого холодним деформуванням та дією мастил на рослинній основі	49
2.2. Досліджувані матеріали, устаткування, прилади та інструменти	54
2.3. Методи та дослідницькі пристрої	57
2.4. Дослідження мікроструктури аустенітних сталей оптичною та електронною мікроскопією	58
2.5. Методи та техніка експериментальних досліджень	59
2.6. Визначення фазового складу сталі при аустенітно–мартенситних перетвореннях	63
Висновки до розділу 2	65
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ	67

3.1. Перевірка математичної моделі на адекватність	67
3.2. Вплив ХПД на структурні перетворення в аустенітних сталях	71
3.3. Вибір екологічно чистої мастильно—охолоджувальної рідини	78
3.4. Явища у процесі різання аустенітних сталей	82
3.5. Наростоутворення у зоні різання	89
3.6. Взаємозв'язок явищ при різанні аустенітних сталей, попередньо зміцнених холодною деформацією, в умовах екологічно чистих МОР	98
Висновки до розділу 3	102
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ	104
4.1. Формування валика стружки при обробці аустенітних сталей	104
4.2. Формування залишкових напружень при холодному пластичному деформуванні аустенітних сталей	107
4.3. Повернення експлуатаційних властивостей деталей із аустенітних сталей прецизійною фінішною термічною обробкою	115
4.4. Отримання порошків із аустенітних сталей для формування захисних покриттів	118
4.5. Розробка технологічного процесу оброблення деталей із аустенітних сталей	119
Висновки до розділу 4	120
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	124
ДОДАТОК А	140
ДОДАТОК Б	146
ДОДАТОК В	151
ДОДАТОК Г	157
ДОДАТОК Д	160
ДОДАТОК Е	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДП – деформуюче протягування;

МОР – мастильно–охолоджувальна рідина;

МСЕ – метод скінчених елементів;

ОМ – оброблюваний матеріал;

ППД – поверхневе пластичне деформування;

РІ – різальний інструмент;

ХДЗ – холодне деформаційне зміцнення;

ХПД – холодне пластичне деформування;

d_0 і d – внутрішній діаметр отвору втулки до та після ДП, мм;

D_0 і D – зовнішній діаметр втулки до та після ДП, мм;

h_0 і h – початкова і кінцева товщина зразка, що піддається поперечному стисненню, мм;

F – критерій Фішера;

$f_{ад}$ – залишкова дисперсія адекватності;

G_p – критерій Кохрена;

t – критерій розподілення Стюдента;

$x_1, x_2, x_i \dots x_k$ – фактори дослідження;

$y_1, y_2, y_i \dots y_k$ – параметри оптимізації;

$\epsilon_{д.п.}$ – ступінь деформації розтягування;

$\epsilon_{ст.}$ – ступінь деформації стиску;

σ_b – межа міцності матеріалу на розрив, МПа;

σ_t – нормальні напруження текучості, МПа;

τ_t – дотичні напруження текучості, МПа;

δ – коефіцієнт відносного видовження, %;

ψ – коефіцієнт відносного звуження, %;

HV – твердість за Брінеллем, кг/мм²; МПа;

HV – твердість за Віккерсом, кг/мм²; МПа;

H_μ – мікротвердість, ГПа;

ВСТУП

Актуальність теми. Аустенітні сталі мають ряд специфічних унікальних властивостей. Серед яких: корозійно—, жаро— та зносостійкість, немагнітність, висока пластичність. Ці сталі застосовуються при виготовленні таких деталей, як: зубці ковшів екскаваторів, щоки каменедробарок, стрілкові рейкові хрестовини, лопатки газових і парових турбін, ротори парових і газових турбін, броньовані плити, деталі транспортних засобів: випускні колектори, глушники, карбюраторні голки, клапанні пластини компресорів, декоративні елементи кузову та салону автомобіля. У той же час аустенітні сталі мають вкрай низьку оброблюваність різанням.

На поліпшення оброблюваності використанням попереднього холодного пластичного деформування (ХПД) указували Я.Г. Усачов, В.М. Подураєв, О.М. Розенберг, Ю.Г. Проскуряков, E.N. Trent, Н.Е. Енагоро та інші. У той же час дослідження цих фахівців не мали системного характеру, стосувались лише напрямку поліпшення оброблюваності пластичних маловуглецевих і низьколегованих сталей. Не відзначалась також роль мастильно— охолоджувальних речовин (МОР) у поєднанні з холодною пластичною деформацією.

У науковій літературі немає інформації щодо застосування аустенітних сталей після холодної деформації для відновлення деталей засобів транспорту.

Тому перспективними методами поліпшення оброблюваності аустенітних сталей є: ХПД та екологічно чисті МОР рослинного походження. Саме такі дослідження були проведені у дисертаційному дослідженні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з науковою тематикою кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства НТУ в рамках НДР: «Забезпечення роботоздатності триботехнічних систем автотранспортних засобів в умовах експлуатації» та «Поліпшення триботехнічних властивостей пар тертя вузлів і механізмів транспортних засобів», у яких здобувач був виконавцем окремих

етапів, а також з прикладною держбюджетною роботою М1208 «Плутон» №0116u000020m (2016–2017 рр) за тематичним планом Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Мета роботи – поліпшення властивостей відновлювальних деталей засобів транспорту, виготовлених із аустенітних сталей, сумісною дією холодного пластичного деформування і екологічно чистих мастильно–охолоджувальних рідин рослинного походження при механічній обробці.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні **завдання**:

- розробка математичної моделі дії характеристик ХПД, режимів механічної обробки та властивостей мастильно–охолоджувальних рідин на процес різання деталей засобів транспорту та створення захисних покриттів із аустенітних сталей;
- визначення ролі дислокаційного механізму та фазових структурних перетворень, ініційованих ХПД, на оброблюваність аустенітних сталей;
- створення ранжувального ряду екологічно чистих МОР рослинного походження та вивчення їх впливу на оброблюваність різанням;
- встановлення взаємодії ХПД і екологічно чистих МОР при механічній обробці аустенітних сталей;
- розроблення методу деформаційного зміцнення пластичних металевих матеріалів холодною пластичною деформацією;
- побудова основи типових технологічних процесів для виробництва і відновлення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей.

Об’єктом дослідження є механічна обробка аустенітних сталей після ХПД та з використанням МОР рослинного походження.

Предметом дослідження є зміна характеристик оброблюваного матеріалу та вплив МОР на поліпшення властивостей деталей засобів транспорту із аустенітних сталей.

Методи дослідження. Робота виконана з використанням положень теорії обробки матеріалів різанням. Для впливу на основні параметри процесу різання застосовувалося поєднання холодної пластичної деформації і використання

мастильно–охолоджуючих рідин рослинного походження. Результати розрахунків за розробленими моделями виконували із застосуванням теорії планування багатофакторного експерименту. Експериментальні дослідження проводилися із використанням методик на вертикально–фрезерному верстаті 6Н13П і гідравлічному пресі ПММ–200. У роботі застосовувалися положення статистики і програмне забезпечення AutoCAD, Visio, Microsoft Office та його додаток Microsoft Office Excel.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблена математична модель дії холодного пластичного деформування, режимів механічної обробки і екологічно чистих мастильно–охолоджувальних речовин рослинного походження на показники оброблюваності аустенітних сталей.

2. Визначена роль збільшення густини дислокацій і фазових структурних перетворень, ініційованих попереднім холодним пластичним деформуванням аустенітних сталей, на оброблюваність таких сталей.

3. Встановлено, що поєднання попереднього пластичного деформування аустенітних сталей із застосуванням екологічно чистих МОР рослинного походження дозволяє отримати позитивний ефект поліпшення оброблюваності таких сталей.

4. Досліджено механіку обробки поліпшених аустенітних сталей на низьких і середніх швидкостях різання: сили, температуру, контактні явища, наростоутворення, додаткове зміцнення, стружкоутворення, залишкові напруження.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено оригінальний метод отримання достатньої кількості зміцненого матеріалу – метод поперечного стиску ХПД.

2. Проведено ранжування екологічно чистих рослинних МОР і порівняння їх ефективності з МОР на мінеральній основі при обробці аустенітних сталей, в

результаті чого встановлено, що оптимальною МОР при низьких і середніх швидкостях різання швидкорізальним інструментом є ріпакова олія.

3. Розроблено типовий процес обробки деталей із аустенітних сталей, яка полягає у попередньому зміцненні матеріалу ХПД, операціях різання із застосуванням МОР на ріпаковій основі і повернення початкових властивостей деталей середнім відпусканням.

4. Рекомендовано застосувати результати дослідження при виготовленні і відновленні наступних деталей засобів транспорту: випускні клапани двигунів, випускні колектори, системи виведення відпрацьованих газів, голок карбюраторів, декоративних та оздоблювальних елементів.

5. Результати дисертаційного дослідження перевірені на ТДВ «Мукачівський машинобудівний завод» (м. Мукачево) і ДП «Завод ім. В.О. Малишева» (м. Харків), а також використані в освітньому процесі Національного транспортного університету при викладанні навчальних дисциплінах «Технологія конструкційних матеріалів» та «Основи інженерії поверхні деталей машин та конструкцій».

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які викладені в дисертації і подані до захисту, отримано здобувачем самостійно. Роботи (Додаток Б) [15, 17, 19] виконані одноосібно. В роботах (Додаток Б), які викладені у співавторстві, автору належить: розробка методики та дослідження оброблюваності аустенітних сталей після холодного пластичного деформування і мастильно–охолоджувальних рідин на рослинній основі [1–7, 10, 11]; розробка способу обробки аустенітних сталей [9]; розробка та перевірка на адекватність математичної моделі процесу оброблюваності деталей і покриттів із аустенітних сталей [16]; теоретичне та експериментальне вивчення дислокаційного механізму та структурних перетворень (аустеніт – мартенсит) [8, 14, 18, 21, 23, 24]; дослідження впливу мастильно–охолоджувальних рідин рослинного походження на контактні процеси системи «стружка – інструмент» [19]; розробка методу поперечного стиску експериментальних зразків [12, 17]; визначення основних напрямків застосування аустенітних сталей [13, 20, 22];

запропоновано використання прецизійної фінішної термообробку у технологічних процесах обробки деталей і покриттів засобів транспорту із аустенітних сталей [15].

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертації доповідались і обговорювались на: LXX, LXXI, LXXII, LXXIII, LXXIV та LXXV наукових конференціях професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (м. Київ, 2014 – 2019 рр.); 14–ом и 17–ом Международном научно–техническом семинаре «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (м. Свалява, 2014 р. та 2017 р.); 12–му, 13–му та 14–му Міжнародному симпозиумі українських інженерів–механіків у Львові (м. Львів, 2015 р., 2017 р. та 2019 р.); Міжнародній науково–технічній конференції «Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин (м. Київ, 2015 р.); III–й Міжнародній інтернет–конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій, м. Вінниця (2015 р.); 16–й Международной научно–практической конференции «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика» (м. Одеса, 2016 р.); Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатація машинобудівних конструкцій (м. Львів, 2016р.); 17–й Международной научно–практической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» (м. Одеса, 2017 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 24 наукових публікаціях, з них: одна стаття у науково–метричній базі «SCOPUS», 6 статей у наукових фахових виданнях України, одна стаття у закордонному виданні, 1 патент України на корисну модель, 15 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 161 сторінок, з яких 96 сторінок основного тексту, 7 таблиць та 50 рисунків.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Основні напрямки поліпшення оброблюваності матеріалів

Аналіз літературних джерел, де розглядається механіка процесу обробки, дозволяє зробити висновок про те, що найбільш ефективним засобом впливу на процеси є фактори, що безпосередньо впливають на стружкоутворення [13, 30, 31, 107].

Оскільки процес різання можна вважати процесом вільного прямокутного різання, то на нього будуть мати вплив три основні фактори: швидкість, передній кут і властивості оброблюваних матеріалів [13].

Досліди проф. Зорева М.М. [13, 31] показали, що роль швидкості різання суттєва при її високих значеннях, спостерігається запізнення процесу пластичного деформування. При низьких швидкостях (до 0,15 м/с) таке запізнення практично не проявляється. Тому, на думку М.М. Зорева, швидкість різання не може розглядатися як фактор, що впливає на покращення оброблюваності пластичних металів.

Фізичний зміст безпосереднього впливу переднього кута на процес стружкоутворення полягає в тому, що він визначає напрямок сходу стружки [13, 31]. Чим більший передній кут, тим менше змінюється напрямок руху оброблюваного матеріалу при його перетворенні у стружку.

Рекомендованими в літературі значеннями переднього кута є 10° – 20° [47, 63, 83, 111, 125].

Фізичний зміст кута дії на процес стружкоутворення, а відповідно, на оброблюваність металу, полягає в зміні напружено–деформованого стану зони стружкоутворення [13, 31]. Зменшення кута дії супроводжується поворотом вектора сили стружкоутворення у бік вектора швидкості різання. При цьому повертаються осі головних напружень, картина напружено–деформованого

стану і площа зсуву, за рахунок чого збільшується кут зсуву. В результаті зменшується деформація оброблюваного матеріалу, усадка стружки, сили різання.

Проф. Зоревим М.М. експериментально показано, що механічні властивості оброблюваного матеріалу безпосередньо впливають на процес стружкоутворення [13, 31]. Так, збільшення опору зсуву при вільному різанні 18-ти різних матеріалів (при σ_v від 240 до 1100 МПа) викликало збільшення кута зсуву з 15° до 35° . При цьому було відмічено зниження деформації та усадки стружки.

Відомі способи впливу на метали та сплави з метою підвищення їхньої оброблюваності різанням можливо звести до 4-х видів: мікролегування кальцієм з додаванням сірки до 0,05% або зниження вмісту марганцю до 0,30–0,35% [56, 57]; термообробка, що змінює мікроструктуру [20, 24]; нагрів перед обробкою різанням [9, 60]; холодне деформаційне зміцнення (ХДЗ) [117].

Загальними недоліками перших трьох методів в порівнянні з останнім є ускладнення технологічних процесів, погіршення екологічних характеристик, а також більш обмежені можливості керування металургійними та термічними операціями у порівнянні з механічними. Принцип реалізації методу ХДЗ матеріалу перед обробкою різанням та його переваги сформулював Усачев Я.Г. ще у 1915 р. [117].

До 50-х років метод різання металу, обробленого ХДЗ, не притягував увагу дослідників. Виняток становила праця І.М. Грязнова [24]. В подальшому, в 50-ті – 90-ті роки з цього питання опубліковано більше ста праць. Найбільш вагомими серед них є праці: І.Дж. Армарего та Р.Х.Брауна [10], А.К. Баєва [11], М.С. Берлінера [12], Г.І. Єпіфанова [29], М.М. Зорева [32], В.С. Кудрявцева [53], проф. Кузнецова А.М. та представників його школи (А.З. Марина, Ж.К. Джунусбекова, І.І. Шацких) [25, 54, 55, 64, 122], Е.І. Фельдштейна, Б.І. Наумова, В.В. Коняшова та А.І. Рязанова [118], проф. Подураєва В.Н. та представників його школи (В.С. Камалова, В.М. Ярославцева, Н.А. Ярославцевої, В.В. Войтова, П.В. Севастьянова, Г.Ф. Шатурова, В.Н. Цуканова) [21, 63, 74, 75, 76, 77, 121,

127, 128, 129], Е.К. Посвятенка, О.М. Розенберга та О.О. Розенберга [95, 96, 104, 105, 108], Е.М. Трента [6], М.І. Ховаха [120], Р.А. Ішмакова, П.А. Семкина та Л.А. Хворостухіна [37], Н.Е. Enahoro [2], Ford C. Brandon [1], Jan Hrubec [3], Kurt Keck [5].

Зміна властивостей металу при ХДЗ, що передувало обробці різанням, призводить до збільшення кута зсуву, а відповідно, до зменшення деформацій в зоні стружкоутворення. Про це свідчить зниження усадки стружки, зусиль та температури різання. Оскільки між усадкою стружки та довжиною її контакту з передньою поверхнею існує зв'язок [7], зміцнення викликає зменшення довжини контакту. Внаслідок цього, а також через зниження зусиль різання змінюються інші контактні характеристики процесу різання (середній контактний тиск, середній тангенціальний контактний тиск, коефіцієнт тертя). Зменшення деформації металу в зоні стружкоутворення та довжини тертя стружки на передній поверхні призводить до зниження роботи різання. Цьому може сприяти також зміна адгезійних та дифузійних властивостей оброблюваного матеріалу в процесі ХДЗ.

ХДЗ має сильний вплив на форму та радіус витка стружки через її усадку та контактні характеристики. Збільшення ступеню зміцнення призводить до зменшення радіуса витка стружки, збільшення щільності його закручування та збільшення можливості переходу елементної стружки у зливну. За даними авторів більшості джерел стійкість інструмента, що працює на зміцненому металі, в 1,6–6 разів вища, ніж стійкість при обробці цього металу в початковому стані. Потрібно виділити, що в літературі також є відомості про негативний вплив ХДЗ на окремі характеристики процесу різання, що відображаються в збільшенні сил різання [11] та інтенсивності наростоутворення [5], збільшенні радіуса завитка стружки [53] та зниження стійкості інструменту [1, 5, 10, 12, 33, 104].

Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що в них відсутні відомості, що дозволяють пов'язати явища, які відбуваються в зонах стружкоутворення та контакту стружки з передньою поверхнею інструменту із

врахуванням наростоутворення при різанні на низьких швидкостях металу після ХДЗ.

1.2. Фізико–механічні властивості аустенітних сталей

Як відомо [66], аустенітні сталі належать до окремого структурного класу, де через зниження критичних точок A_1 і A_3 аустенітна область на діаграмі стану простягається до кімнатних температур і нижче. Отже, це високовуглецеві сталі, леговані значною кількістю марганцю, наприклад, сталь Гатфільда (110Г13Л), комплексно леговані хромонікелеві маловуглецеві (12Х18Н10Т та ін.) і середньовуглецеві сталі (40Х14Н14В2М, 60Х22Н8Г2АМБФ тощо), або маломагнітні та немагнітні сталі спеціального призначення. Паралельно високе легування аустенітних сталей призводить до зниження критичної точки A_2 (точки К'юрі), при якій парамагнітний стан матеріалу при охолодженні переходить у феромагнітний стан. Таким чином, сталі аустенітного класу при звичайних і низьких температурах є немагнітними. Аустеніт має твердість порядку 170 – 200 НВ, досить високу міцність ($\sigma_s = 500 - 800$ МПа) і надзвичайно високу пластичність ($\delta \approx 50\%$; $\psi \approx 60\%$). Поєднання високих значень зносостійкості і в'язкості аустеніту з достатньою міцністю забезпечує необхідну довговічність виробів із високовуглецевих аустенітних сталей за умови абразивного зношування, посиленого ударними навантаженнями.

З іншого боку, мало– та середньовуглецеві аустенітні сталі є корозійностійкими та жаростійкими. При цьому висока корозійна стійкість досягається за рахунок утворення тонкої міцної оксидної плівки на поверхні сталі при забезпеченні доброго зчеплення плівки з основним металом. Введення у сталь великої кількості хрому ($\geq 13\%$) викликає пасивацію останньої, тобто припинення електрохімічної корозії (атмосферної, ґрунтової, під впливом водних розчинів кислот, лугів та солей). У жаростійкі сталі, крім хрому, додають також кремній та алюміній, що утворюють щільну плівку оксиду, яка перешкоджає проникненню кисню вглиб металу і припиняє корозію. Жаростійкі

та жароміцні сталі використовуються у побутовій техніці, хімічному обладнанні, хірургічному інструменті, лопатках парових і газових турбін, клапанах дизелів, деталях реактивних двигунів та ін.

Разом з тим, загальним недоліком сталей аустенітного структурного класу є їхня низька оброблюваність лезовим та абразивним різальним інструментом. Нами висунута гіпотеза, що пояснює це явище. Оскільки ще з часів І.А. Тіме і О.М. Розенберга [103] до теперішнього часу різання металів аргументовано ідентифікується як процес глибоких пластичних деформацій, головним чином простого зсуву, то аустенітні сталі у зонах стружкоутворення та контакту мають пройти усі стадії цього процесу від початку до руйнування. Але, оскільки сталі даного класу є високопластичними і, водночас, міцними, то процес їхнього різання є надзвичайно напруженим. Про це, зокрема, можна судити зі значень коефіцієнта усадки стружки, який квазикількісно характеризує процес, і може зазвичай сягати значень 5 і більших.

Найпоширеніші сталі аустенітного класу створені на основі систем Fe–Cr–Ni, Fe–Cr–Mn, Fe–Cr–Mn–N. Добре вивчені фізико–механічні властивості, відпрацьована технологія виготовлення з них напівфабрикатів та виробів, роблять їх комерційно доступними. Розглянемо, як формується структура цих сталей на підставі аналізу відповідних діаграм стану.

Діаграма стану Fe–Mn. Залізо і марганець за високих температур утворюють неперервний ряд твердих розчинів з γ -граткою (рис. 1.1). Під час охолодження відбуваються алотропічні перетворення марганцю і заліза. Найбільший інтерес викликають сплави, багаті залізом. Марганець так само, як і нікель, належить до елементів, що розширюють γ -область.

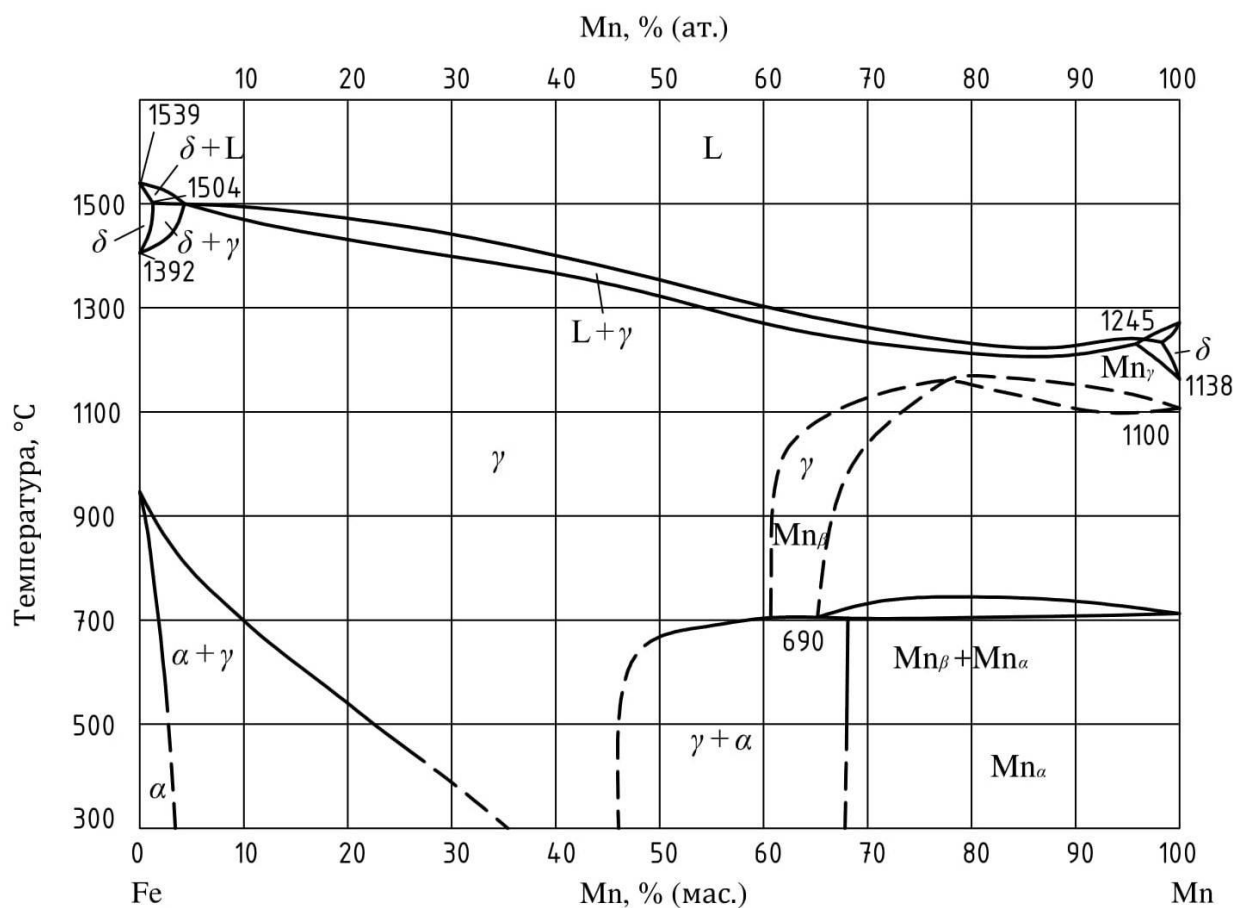


Рисунок 1.1 – Діаграма стану Fe–Mn

На відміну від нікелю, марганець при додаванні у хромисті сталі не розширює область існування γ -твердого розчину за підвищених температур. Лінія АВ на діаграмі (рис. 1.2) розділяє область існування γ -фази та $(\gamma+\delta)$ -фаз при 1000 °C. Пунктирною лінією показана область існування аустеніту в системі Fe–Cr–Ni при 1000 °C. Зокрема, в міру збільшення вмісту нікелю підвищується вміст хрому, за якого ще можливе існування чистої γ -фази. І навпаки, жодна хромомарганцева сталь не може мати суто аустенітну структуру при 1000 °C, якщо вона містить більше ніж 15% хрому. Марганець стабілізує аустеніт, який утворився за високої температури. Отже, сталь з 13–14% Cr при охолодженні набуває мартенситної структури, але залишається аустенітною, якщо в ній міститься достатня кількість марганцю. Можливість існування аустенітної структури залежить переважно від співвідношення між вмістом у сталі хрому і вуглецю. Наприклад, у сталі, що містить 18% Cr і 0,3% C, стабільність аустеніту

зберігається у разі нагрівання до високих температур, але в результаті охолодження – відбувається мартенситне перетворення.

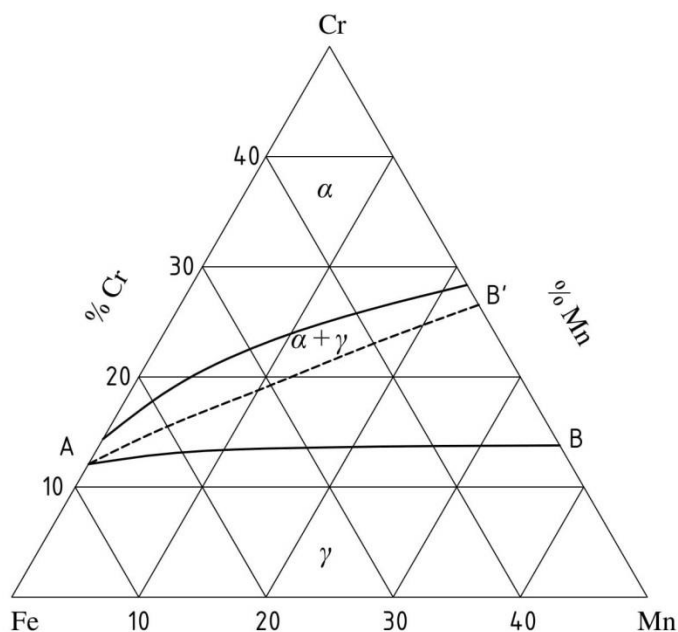


Рисунок 1.2 – Ізотермічний переріз при 1000 °C потрійної діаграми Fe–Cr–Mn (0,1% C)

Для збереження аустенітної структури у сталі типу 18–8 (наприклад, сталі марок 12X18H9, 12X18H8T) під час легування до 3% Мо та за постійного вмісту хрому кількість нікелю необхідно збільшити на 4%. Тоді у структурі сталі утворюватиметься σ -фаза. Легування стабілізаторами (Ti та Nb) використовується переважно для зменшення схильності цих сталей до міжкристалічної корозії. Зокрема, вміст титану повинен бути у 6–8, а ніобію у 10–12 разів більший від вмісту у цих сталях вуглецю. Утворюючи стійкі карбіди, титан і ніобій зменшують кількість аустеніту і сприяють утворенню фериту. Тому для збереження у сплавах суто аустенітної структури необхідно відповідно підвищити вміст нікелю. Легування аустенітних хромонікелевих сталей вольфрамом у кількості до 3% підвищує їхню жароміцність та втомну міцність. Мікролегування бором інтенсифікує зміцнення цих сталей за механізмом дисперсійного тверднення.

1.3. Основні області застосування аустенітних сталей у машинобудуванні

Сталі аустенітного класу використовуються під час виготовлення газових турбін, транспортних силових установок, турбін реактивних двигунів, турбокомпресорів, деталей і апаратури для роботи за високих тисків у хімічній промисловості, в атомних реакторах нового покоління і, у перспективі, у термоядерних реакторах. У таблиці 1.1 наведено хімічний склад аустенітних марок сталі.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталей аустенітного класу

Марка	Вміст елементів, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	N	B	Nb
12X18H10T	0,12	0,8	2,2	18	10	–	–	<0,1	–	–	–
316SS	0,08	1,0	2,0	17	12	2,5	–	–	–	–	–
PCA	0,05	0,4	1,7	14	16	2,5	–	0,25	–	–	–

Одним із методів зміцнення аустенітних сталей є деформаційне $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення під час холодного оброблення тиском, коли прикладені напруження викликають перетворення метастабільного аустеніту на мартенсит. Це перетворення інтенсифікується у разі зниження температури деформації або збільшення ступеня деформації. Нагрівання холоднодеформованої сталі викликає повернення, рекристалізацію, виділення карбідів хрому та у окремих випадках – утворення α -фази.

Сталі типу 18–10, 18–9 (таблиця 1.1, американський аналог – сталь 316SS) є базовими для гарячої зони реакторів на швидких нейронах у багатьох країнах світу. Сталь марки PCA спеціально розроблена для використання у термоядерних реакторах та відрізняється від сталей типу 316 підвищеним вмістом нікелю, зниженим вмістом хрому та стабілізована титаном.

Крім того, нікель характеризується дуже високою розчинністю у рідинно–металевих теплоносіях. У зв'язку з цим сьогодні все більшу популярність

набувають хромомарганцеві сталі, що містять азот, які характеризуються швидшим спадом наведеної активності та підвищеною корозійною тривкістю у металевих розплавах–теплоносіях.

Температура, за якої зникає наклеп, створений попереднім механічним обробленням, тим нижча, чим менший вміст вуглецю у сталі. Зокрема, для усунення наслідків наклепу сталь, що містить 0,02% С, досить нагрівати до температури 950 °С, тоді як при вмісті вуглецю 0,14% або 0,21%, щоб зняти наклеп, необхідно підняти температуру до 1050–1150 °С.

Для відновлення властивостей наклепаного матеріалу здійснюють відпуск у інтервалі температур 175–315 °С з витримкою протягом 24–72 годин та подальшим охолодженням на повітрі.

Радикальний спосіб зміцнення аустенітних сталей – холодний наклеп, при деформації близько 80–90%, коли границя текучості досягає 1000–1200 МПа, а границя міцності 1200–1400 МПа при збереженні достатньо високої пластичності (30–50%). Такий спосіб зміцнення застосовується лише для таких видів напівфабрикатів, як тонкий лист, стрічка, дріт тощо.

Вуглецеві та маловуглецеві сталі не стійкі до корозії. Підвищення стійкості до корозії в розчинах, досягається введенням в сталь елементів, які утворюють на поверхні захисні плівки, що надійно зв'язані з основним металом та підвищують їх електрохімічний потенціал в різних агресивних середовищах. Такими елементами є хром, нікель, алюміній, кремній. При цьому слід враховувати, що алюміній та кремній знижують пластичність сталі.

При введенні хрому в кількості 13–14%, на поверхні утворюється щільна захисна плівка Cr_2O_3 , сталь стає пасивною і її корозійна стійкість різко підвищується.

Сталі, стійкі до електрохімічної корозії, можна розділити на два класи: хромисті (феритні або мартенситні) та хромонікелеві (аустенітні).

В хромистих сталях, що містять хрому до 13%, при нагріванні та охолодженні протікає $\alpha \rightarrow \gamma$ – перетворення; після охолодження на повітрі сталі 20X13, 30X13, 40X13 мають мартенситну структуру (мартенситний клас), 10X13

– мартенситно–феритну (мартенситно–феритний клас), а 08X13 – феритну (феритний клас).

Сталі 10X17, 15X25Т, 15X28Т, що містять відповідно 17, 25, 28% хрому, відносять до феритного класу.



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 1.3 – Приклади використання високомарганцевих аустенітних сталей:

а – ланка гусениці транспортних машин; *б* – зубок ковша екскаватора;

в – стрілочний перевід залізничних рейок; *г* – деталі виконавчих органів каменедробарок; *д* – фрагмент броні легкої транспортної машини спеціального призначення

Термічна обробка сталей мартенситного класу полягає в гартуванні від температури 1000 °С з низьким відпуском (30X13, 40X13) на мартенсит відпуску (для виробів підвищеної міцності), або в гартуванні та високому відпусканні при 600–700 °С (10X13, 20X13) на сорбітну структуру (для деталей з підвищеною пластичністю).

Сталі типу 110Г13Л (рис 1.3) використовуються при виготовленні траків гусеничних машин, зубців ковшів екскаваторів, стрілочних переводів залізничних рейок, деталей каменедробарок, газових турбін транспортних силових установок, турбін реактивних двигунів, турбокомпресорів, деталей і апаратури для роботи з високими тисками у хімічній промисловості, в атомних реакторах і, в перспективі, у термоядерних реакторах.

1.4. Відомі способи холодного пластичного деформування у машинобудуванні

Деформуюче протягування (ДП), це технологічна операція, при проведенні якої на трубчастих деталях кінцевої товщини зі значними деформаціями зміцнюється наскрізь стінка виробу. Крім цієї обов'язкової деформації розтягу, поверхневий шар виробу на глибину до кількох десятків часток міліметра піддається деформації зсуву, викликаній взаємодією деформуючих елементів, які пересуваються по оброблюваній поверхні в режимі ковзання з деталлю. Таким чином, ДП є потужним засобом холодного деформаційного зміцнення деталі.

З представлених на рис. 1.4, як приклад, даних впливає наступне. Деформуюче протягування зміцнює серцевину деталі зі сталі 10 на 45% (початкова твердість $H_{\mu} = 1,1$ ГПа) і сталі 35 – на 30% (початкова твердість $H_{\mu} = 1,9$ ГПа).

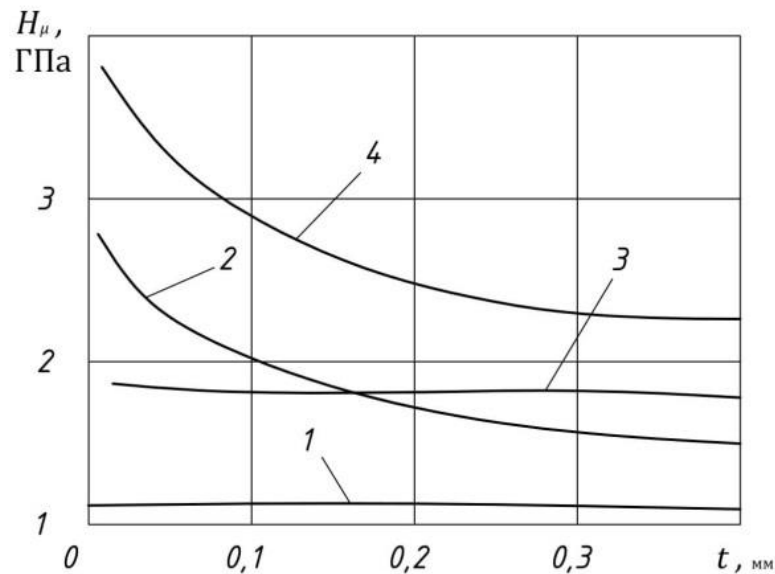


Рисунок 1.4 – Залежність мікротвердості H_μ від товщини t стінки трубчастої деталі при протягуванні сталі 10 і сталі 35: $v = 0,15$ м/с; $a = 0,15$ мм; деформуючий елемент – твердий сплав ВК15М із забірним конусом $\alpha_3 = 4^\circ$; МОР – сульфифрезол. Криві 1 і 3 – сталі 10 і 35 відповідно в незміцненому стані; криві 2 і 4 – сталі 10 і 35 відповідно у зміцненому стані

Відомо, що ступені деформації при розтягуванні і стисненні є еквівалентними за своїм зміцнюючим ефектом. Тому середню ступінь деформації розтягування $\varepsilon_{\text{д.п.}}$, якій піддається метал стінок втулок при ДП, можна порівнювати зі ступенем деформації при одновісному стисненні $\varepsilon_{\text{ст.}}$. При ДП і одновісному стисненні метал отримує рівні ступені зміцнення, якщо виконується умова:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \varepsilon_{\text{д.п.}}, \quad (1.1)$$

або

$$\frac{h}{h_0} = \frac{D_0 + d_0}{D + d}, \quad (1.2)$$

де h_0 і h – початкова і кінцева висота зразка, що піддається одновісному стисненні; d_0 і d – внутрішній діаметр отвору втулки до та після ДП; D_0 і D – зовнішній діаметр втулки до та після ДП.

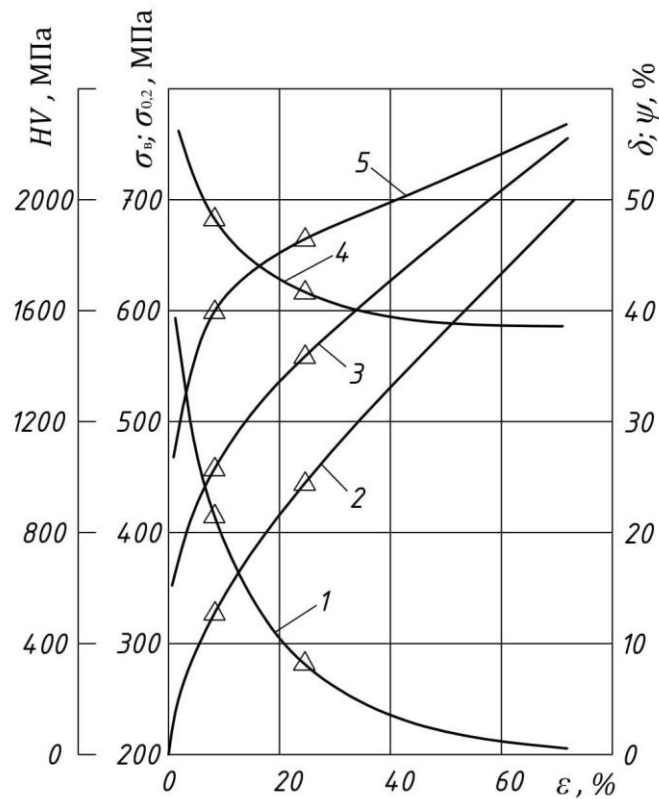


Рисунок 1.5 – Залежності механічних властивостей сталі 10 від ступеня деформації ε при одновісному стисненні (лінії) та деформуючому протягуванні (відмітки): 1 – δ ; 2 – $\sigma_{0,2}$; 3 – $\sigma_{в}$; 4 – ψ ; 5 – HV

Залежності, наведені на рис. 1.5, показують, що сталі, зміцненні ДП та одновісним стисненням, за однакових ступенів деформації, мають однакові механічні властивості.

Сучасний арсенал **способів зміцнення поверхневим пластичним деформуванням (ППД)** нараховує біля 10 напрямів статичних та динамічних способів виконання оздоблювально–зміцнювальних операцій [9, 45, 79].

Статичні способи зміцнення характеризуються сталим нерозривним контактуванням зміцнювального інструмента з поверхнею деталей, для динамічних способів характерний дискретний, ударний контакт інструмента із зміцнюваною деталлю.

Найбільш широкоживаними способами статичного зміцнення є вигладжування, обкатування (розкатування) та зміцнення тертям.

Переваги статичних способів зміцнення деталей ППД:

- здатність забезпечити низьку шорсткість оброблених поверхонь з утворенням регулярного мікрорельєфу;
- широка універсальність;
- простота, надійність та незначна вартість оснащення для реалізації;
- здатність регулювання у широких межах технологічних параметрів процесу зміцнення;
- придатність для застосування не тільки для зміцнювальних, а й для оздоблювальних операцій.

До недоліків способів статичного зміцнення слід віднести їх незначну продуктивність та низький рівень залишкових напружень стиску і товщину зміцненого шару металу.

Вигладжування полягає в пластичному деформуванні оброблюваної поверхні інструментом–вигладжувачем. При цьому нерівності поверхні, які залишились від попереднього оброблювання, згладжуються частково або повністю, поверхня набуває дзеркального блиску, підвищується твердість поверхневого шару, в ньому утворюються стискаючі залишкові напруження, змінюється мікроструктура і формується текстура.

Обкатування (розкатування) здійснюється роликами і кульками. У зоні контакту деформуючих елементів і деталі інтенсивність напружень перевищує межу текучості, в результаті мікронерівності пластично деформуються, змінюються фізико–механічні властивості та структура поверхневого шару, зростає мікротвердість, у поверхневому шарі матеріалу утворюються залишкові напруження. Об’ємна деформація деталі при цьому незначна.

Суть способу зміцнення тертям полягає в тому, що деталь, закріплену на верстаті нерухомо або з можливістю обертання, зміцнюють інструментом–диском із загартованої сталі і низьковідпущеної сталі, який обертається з великою швидкістю.

Основною характерною ознакою динамічних способів зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням є дискретна, ударна взаємодія

інструмента з обробленою поверхнею. Наявність ударного контактування забезпечує високий градієнт залишкових напружень стиснення, підвищення поверхневої мікротвердості, і суттєву товщину зміцненого шару матеріалу.

Переваги динамічного зміцнення:

- висока продуктивність завдяки одночасному використанню великої кількості деформуючих інструментів;
- забезпечення високого рівня показників якості зміцнювального оброблювання (товщини зміцненого шару, поверхневої мікротвердості і залишкових напружень стиску).

Недоліки способів динамічного зміцнення:

- забезпечення гіршої у порівнянні із статичними способами якості обробленої поверхні, вищої шорсткості;
- недовговічність інструменту через динамічні ударні навантаження.

Суть методу **рівноканального кутового пресування** полягає в багаторазовому проштовхуванні зразків через однакові за розмірами канали, що сполученні між собою під певним кутом φ (рис. 1.6). Зразок деформується за схемою простого зсуву. Величина кута φ варіюється в межах $90 - 150^\circ$. Кількість деформаційних проходів при рівноканальному кутовому пресуванні сягає від 4 до 10 разів.

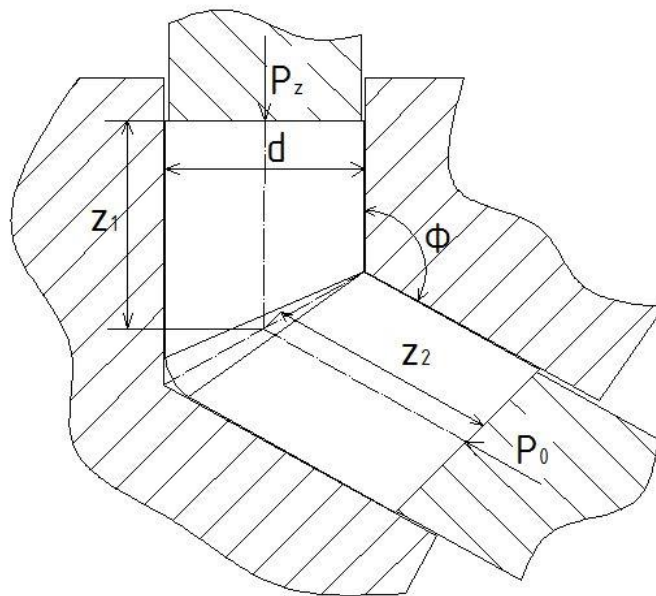


Рисунок 1.6 – Схема рівноканального кутового пресування

До переваг даного методу можна віднести:

- отримання однорідної субмікрокристалічної структури всього зразка;
- підвищена пластичність зразків при низьких температурах та високих швидкостях деформації;

- підвищення втомної міцності;

- отримання довгих зразків.

Недоліками методу є:

- складність виконання процесу;

- трудоємність отримання кінцевого зразка;

- підвищенні вимоги до якості зразків;

- обмежена можливість роботи з малодеформаційними матеріалами.

Спосіб випереджуючої деформації реалізується шляхом вільного ортогонального різання з режимами, що забезпечують наростоутворення. Мікротвердість визначають на зразку матеріалу, отриманого методом миттєвої зупинки процесу і виготовлення мікрошліфа методом металографії. Мікротвердість вимірюють на наступних ділянках зразка (рис. 1.7): у глибині незміцненого матеріалу 1; на початку 2, в середині 3 та на кінці 4 зони стружкоутворення; у глибині 5 та у прирізцевій зоні 6 стружки; у тілі наросту 7. Отриманні значення мікротвердості перераховують у максимальні нормальні та дотичні напруження текучості і будують криву текучості в координатах “деформація – межа текучості”.

Нормальні та дотичні напруження текучості σ_T і τ_T вираховують згідно:

$$\sigma_T = (0,35 - 0,38)\sigma_B, \quad (1.3)$$

$$\tau_T = 0,185HV, \quad (1.4)$$

де σ_B – межа міцності матеріалу на розрив, МПа.

Слід зауважити, що між межею міцності матеріалу на розрив σ_B і величиною твердості за Віккерсом HV чи мікротвердістю H_μ , існує залежність:

$$\sigma_B = (0,12 - 0,13)HV. \quad (1.5)$$

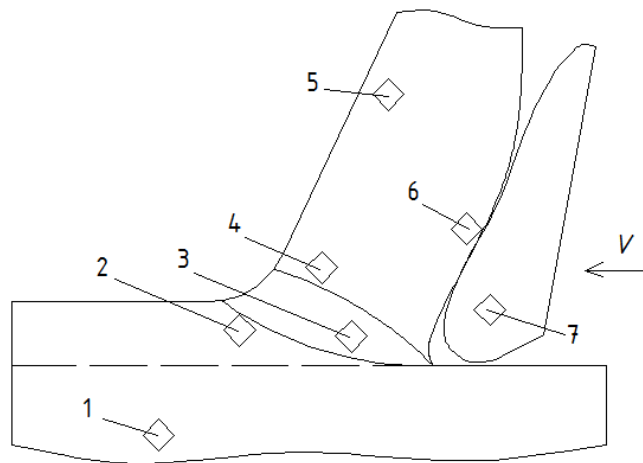


Рисунок 1.7 – Схема способу випереджуючої деформації

Суть *методу одновісного стиску* отримання деформованого матеріалу полягає в стисненні зразків уздовж осі до отримання співвідношення між сторонами один до одного (рис. 1.8).

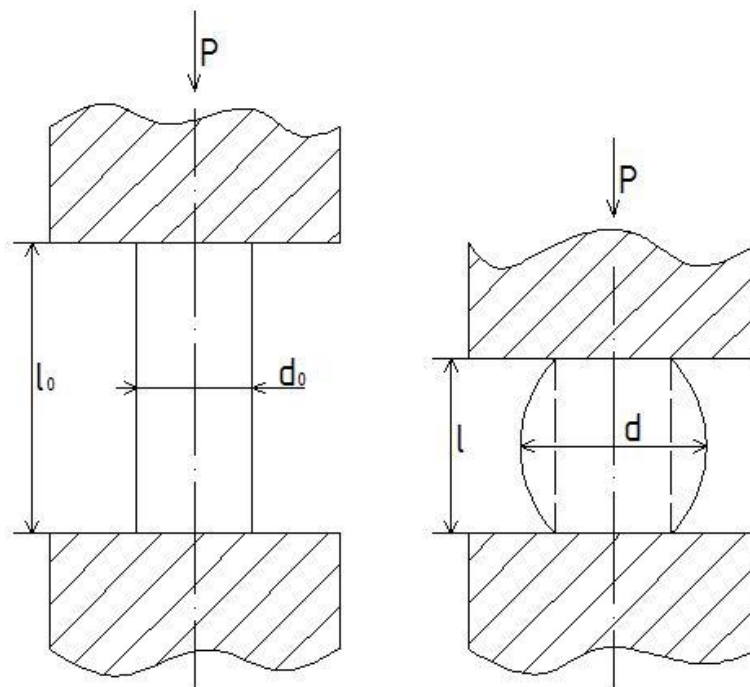


Рисунок 1.8 – Схема одновісного стиску

Метод реалізовується за декілька циклів стискання та видалення зайвого матеріалу, до отримання зразка з максимальною твердістю.

Переваги методу:

- досягнення максимально можливої твердості зразків;
- отримання великої (потрібної для досліджень) кількості зміцненого матеріалу;
- рівномірність твердості всього об'єму зразка.

Недоліки методу:

- трудоємкість;
- обмеження довжини досліджуваних зразків.

Таким чином спільними недоліками відомих способів ХПД є:

- відносно невелика кількість зміцненого металу (способи статичного і динамічного зміцнення ППД);
- невисокий ступінь зміцнення основи при наскрізному деформуючому протягуванні і дорнуванні трубчастих деталей;
- складність оснастки і трудомісткість процесу (одновісний стиск, рівноканальне кутове пресування і метод різця, що падає).

Нами не розглядався класичний спосіб розриву зразків типу гагарінських, відомий із курсу опору матеріалів, який має ті самі недоліки, що і вказані вище.

1.5. Мастильно–охолоджувальні рідини при обробці аустенітних сталей

Масляні МОР. Ці МОР складаються з базового мінерального масла, до якого можуть бути додані антифрикційні, антизношувальні та антизадирні присадки, інгібітори корозії, антиоксиданти та антитуманні присадки.

Антифрикційні присадки – зазвичай це технічні рослинні масла та жири (ріпакове масло, жир), жирні кислоти та їх ефіри, а також полімерні ненасиченні жирні кислоти. Їх вміст складає 5–25%.

Антизношувальні присадки – зменшують зношування різального інструменту при збільшенні навантаження. Найбільш відомі у складі масляних МОР – діалкілфосфіт, а також сірковмісні жири та полімерні жирні кислоти.

Концентрація протизносних присадок у масляних МОР зазвичай 0,5–5%, залежить від призначення продукту, а також складу інших присадок.

Антизадирні присадки попереджують схоплення та зношування різального інструменту при найбільш тяжких температурних та механічних навантаженнях. Частіше всього це речовини, які містять сірку, хлор, фосфор. В залежності від умов застосування масляних МОР, вміст в них сірки складає від 0,5–3% (сульфіди та напівсульфіди) до 3–20% (сірковмісні жири).

Недоліками масляних МОР є порівняльно низькі охолоджуючі властивості та низька термічна стабільність, пожежонебезпека, підвищена випаровуваність та висока вартість.

Тверді МОР. За хімічним складом розділяються на три класи: неорганічні продукти шаруватої структури (тальк, графіт, слюда, дисульфід молібдену та інші), органічні з'єднання (воски, мила, тверді жири, полімери) та м'які метали (олово, свинець, мідь). Застосовують їх в особливо складних умовах (при високих температурах та навантаженнях), а також в тих випадках, коли інші типи МОР не ефективні. Тверді мастила наносять в якості поверхневих покриттів на різальний інструмент чи оброблюваний метал.

Змащувальна дія МОР. Змащувальна дія МОР проявляється переважно в зоні контакту різця та стружки, а також контакту різця та заготовки. Вона зумовлена властивістю МОР вступати в фізичну, хімічну та фізико-хімічну взаємодію з активованими поверхнями контактної зони і утворювати на них гідродинамічні, фізичні (адсорбційні) та хімічні мастильні плівки. В залежності від умов різання, ці плівки можуть утворюватися порізно або одночасно. Фізичні та хімічні мастильні плівки прийнято називати граничними. Їх товщина складає від декількох десятків до декількох сотень ангстрем. Опір зсуву у них вищий, ніж у гідродинамічних плівок. У випадку утворення при різанні металів гідродинамічних мастильних плівок, наприклад, обробка міді на низьких швидкостях, поверхні, що труться, розділенні шаром МОР у декілька мікрон і більше. В'язкість МОР має переважне значення і повинна бути оптимальною.

Інколи в'язкість може бути компенсована сірко-, хлор- чи фосфоровмісними присадками.

Змашувальна дія МОР проявляється ще й в тому, що вуглець, кисень, сірка, фосфор та інші елементи, що входять до складу МОР, в умовах високих тисків, напружень та температур не тільки реагують з поверхнею металу з утворенням граничної мастильної плівки, але й дифундують в найтонші поверхневі шари металевих поверхонь, що труться, утворюючи евтектичні сплави з більш низькими коефіцієнтами тертя. У результаті цього полегшуються процеси тертя і пластичної деформації металу.

Активні масляні МОР в основному використовують при силовому різанні важкооброблюваних матеріалів і особливо, коли процес стружкоутворення супроводжується появою наросту. Однак через високу активність сірковмісних присадок, що входять в їх склад, ці МОР можуть спричинити зниження стійкості інструменту.

МР-7 – сірковмісне мінеральне масло середньої в'язкості. Застосовують при середніх та важких режимах різання сталей та сплавів на токарних автоматах і окремих операціях свердління, глибокого свердління отворів діаметром більше 30 мм, точіння, фрезерування, розвертування, протягування, різьбо- та зубонарізання.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є поліпшення властивостей відновлювальних деталей засобів транспорту, виготовлених із аустенітних сталей, сумісною дією холодного пластичного деформування і екологічно чистих мастильно-охолоджувальних рідин рослинного походження при механічній обробці.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні **завдання**:

1. Розробити математичну модель дії характеристик ХПД, режимів механічної обробки та властивостей мастильно-охолоджувальних рідин на процес різання деталей засобів транспорту та створення захисних покриттів із аустенітних сталей.

2. Визначити роль дислокаційного механізму та фазових структурних перетворень, ініційованих ХПД, на оброблюваність аустенітних сталей.
3. Створити ранжувальний ряд екологічно чистих МОР рослинного походження та вивчити їх вплив на оброблюваність різанням.
4. Встановити взаємодію ХПД і екологічно чистих МОР при механічній обробці аустенітних сталей.
5. Розробити метод деформаційного зміцнення пластичних металевих матеріалів холодною пластичною деформацією.
6. Побудувати основу типових технологічних процесів для виробництва і відновлення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ОБРОБЛЮВАНOSTІ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ І ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Математична модель процесу різання аустенітних сталей, інтенсифікованого холодним деформуванням та дією мастил на рослинній основі

Для побудови математичної моделі процесу різання аустенітних сталей було обрано метод крутого сходження. Даний метод дозволяє отримувати статистичні математичні моделі процесів, використовуючи факторне планування, регресивний аналіз та рух уздовж градієнту.

При плануванні експерименту проводився вибір кількості та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленої задачі з заданою точністю. При цьому вагомим є наступне:

- прагнення до мінімізації загальної кількості дослідів;
- одночасне варіювання всіма змінними, що визначають процес, за спеціальними правилами – алгоритмами;
- використання математичного апарату, який формалізує багато дій дослідника;
- вибір чіткої стратегії, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення після кожної серії дослідів.

Задачі пошуку оптимальних умов є одними з найбільш розповсюджених науково-технічних задач. Задачі, що сформульовані таким чином, називаються *задачами оптимізації*. Процес їх вирішення називається процесом оптимізації або просто оптимізацією.

Для опису об'єкта дослідження зручно користуватися уявленням про кібернетичну систему. Інколи таку кібернетичну систему називають “чорним ящиком” (рис. 2.1). Стрілки праворуч показують числові характеристики цілей дослідження. Вони позначаються буквою y та називаються параметрами оптимізації. Ці параметри – це усадка ζ і повна довжина контакту стружки з

передньою поверхнею інструменту c , які служать мірилом оброблюваності і пов'язані між собою залежністю професора М.Ф. Полетики [78]:

$$\frac{c}{a} = \xi^l, \quad (2.1)$$

де $l = 1,5$ при $\xi < 4$; $l = 1,3$ при $\xi > 4$.

При цьому ξ – це y_1 , а c – y_2 .



Рисунок 2.1 – Схема опису об'єкту дослідження

Для проведення дослідження необхідно мати можливість впливати на поведінку “чорного ящика”. Всі способи такого впливу позначаються буквою x та називаються факторами. У нашому випадку – це ХПД (HV , H_μ , МПа), МОР (олії рослинного походження) та v (м/с), відповідають x_1 , x_2 , x_3 .

При вирішенні задач використовуються математичні моделі об'єкту дослідження. Під математичною моделлю мається на увазі рівняння, що пов'язує параметр оптимізації з факторами. Це рівняння в загальному вигляді можна записати так:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (2.2)$$

Така функція називається функцією відгуку. Кожний фактор може приймати в досліді одне з декількох значень. Такі значення називаються рівнями.

До об'єкту дослідження висувалися дві вимоги:

- результати досліді мають бути повторюваними, тобто, при неодноразовому проведенні досліді в різний час, результати мають бути схожими та вписуватися в межі заздалегідь заданої похибки;
- об'єкт має бути керованим, тобто, можна вибирати різні рівні факторів.

В роботі розглядається техніко–економічний параметр оптимізації – продуктивність. Такі параметри, як довговічність, надійність та стабільність, пов'язані з тривалим спостереженням.

До параметра оптимізації висувають декілька вимог. Параметр повинен бути кількісним, тобто виражатися у числовому вигляді, має бути вимірюваним за будь–якої комбінації вибраних рівнів факторів. Множина значень, які може отримувати параметр оптимізації, називається областю визначення.

Наступна вимога: параметр оптимізації повинен виражатися одним числом. Ще однією з вимог є універсальність або повнота параметра оптимізації, тобто його здатність характеризувати об'єкт з різних сторін.

До факторів математичної моделі висувають наступні вимоги: кожен фактор має область визначення – це сукупність всіх значень, які може приймати фактор. Модель має бути безперервною та дискретною.

Фактори розподіляються на кількісні та якісні. Якісні фактори – це різні речовини, технологічні способи, прилади, виконавці та інше. Для обчислення якісні фактори потрібно закодувати, тобто присвоїти їм деяке число натурального ряду. При плануванні експерименту фактори мають бути керованими та однозначними.

Всі фактори мають бути поєднувальні, що означає, що всі їх комбінації є можливими та безпечними.

Ще одним важливим моментом є незалежність факторів, тобто можливість визначення фактору на будь–якому рівні, незалежно від інших факторів. Звідси випливає ще одна вимога – відсутність кореляції між факторами. Залежність між факторами має бути нелінійна.

Для факторів існує область визначення. Це означає, що у кожного фактора є мінімально та максимально можливі значення, між якими він може змінюватися або безперервно, або дискретно.

При плануванні повного факторного експерименту слід вибрати нульовий рівень, тобто багатовимірну точку у факторному просторі. Це було зроблено на основі аналізу апіорної інформації. Побудова плану експерименту проводилася

шляхом вибору експериментальних точок, що симетричні відносно нульового рівня.

При виборі інтервалів варіювання, визначалося деяке число, додавання та віднімання якого дає відповідно верхній та нижній рівні фактора. Для спрощення записів умов експерименту та обробки експериментальних даних масштаби на осях було обрано так, щоб верхній рівень відповідав +1, нижній –1, а основний – 0.

Точність фіксування факторів визначалася точністю пристроїв та стабільністю рівня в ході дослідів. Точність умовно можна розділити на три рівні:

- високий – похибка не більше 1%;
- середній – похибка не більше 5%;
- низький – похибка більше 10%.

При високій точності фіксування факторів та нелінійній кривизні поверхні відгуку, обирається вузький інтервал варіювання.

Експеримент, в якому реалізуються всі можливі поєднання рівнів факторів, називається повним факторним експериментом.

Властивості повного факторного експерименту типу 2^k :

– симетричність відносно центру експерименту – це алгебраїчна сума елементів вектор–стовпців кожного фактору рівна нулю;

– умова нормування – це сума квадратів елементів кожного стовпця, що рівна числу дослідів:

$$\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 = N; \quad (2.3)$$

– ортогональність матриці, виконується при умові, що сума добутків будь-яких двох членів вектор–стовпця матриці рівна нулю:

$$\sum_{i=1}^N x_{ji}x_{ui} = 0, \quad (2.4)$$

де $j \neq u, \quad j, u = 0, 1, 2, \dots, k$.

У нашому випадку ми маємо нелінійну модель, в якій один фактор залежить від рівня, на якому знаходиться інший фактор. Розглянемо матрицю повного факторного експерименту типу 2^3 з нелінійною залежністю між факторами. В цьому випадку матриця матиме наступний вигляд (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Матриця повного факторного експерименту типу 2^3 з нелінійною залежністю між факторами

№ спроби	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y
1	+	-	-	+	+	-	-	+	y_1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
4	+	+	+	+	+	+	+	+	y_4
5	+	-	-	-	+	+	+	-	y_5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	y_6
7	+	-	+	+	-	-	+	-	y_7
8	+	+	+	-	+	-	-	-	y_8

Виходячи з даної матриці, запишемо рівняння математичної моделі:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (2.5)$$

Проведення повторних (або паралельних) дослідів не дає повністю однакових результатів, тому що завжди існує помилка досліду (помилка відтворюваності). Цю помилку потрібно оцінити при паралельних дослідях. Для цього дослід відтворюється за можливості в однакових умовах декілька разів, а потім, береться середнє арифметичне всіх результатів.

Відхилення результату будь-якого досліду від середнього арифметичного можливо представити як різницю $y_q - \bar{y}$, де y_q – результат окремого досліду. Наявність відхилень свідчить про змінність, варіаційність значень повторних дослідів. Для вимірювання цієї змінності використовувалась дисперсія. Дисперсією називається середнє значення квадрату відхилень величини від її середнього значення. Дисперсія позначається s^2 і виражається формулою [14], що наводиться нижче у 3.1.

Там же проведено перевірку математичної моделі на адекватність.

2.2. Досліджувані матеріали, устаткування, прилади та інструменти

У ході роботи було використано ряд засобів для проведення експериментів та отримання коректних результатів. Серед цих засобів: стаціонарний пристрій для визначення хімічного складу металів SPECTROMAXx (рис. 2.2); металографічний мікроскоп МИМ–7 для вивчення мікроструктури металів оптичними методами; електронний мікроскоп РЭМ–106И (рис. 2.3, 2.4) для дослідження мікроструктури матеріалів; твердомір ХПО–250 для визначення твердості матеріалу за методом Віккерса; мікротвердомір ПМТ–3 (рис. 2.5) для визначення мікротвердості досліджуваних зразків; гідравлічний прес ПММ–200 (рис. 2.6) для проведення холодної пластичної деформації; фрезерувальний верстат 6Н13П для проведення дослідів з різання; різці Р6М5 з примусовим формуванням стружки; мікроскоп МПБ–2 для визначення довжини контакту стружки з різцем; токарно–гвинторізний верстат 16К20 для виготовлення досліджуваних зразків; установка для отримання металографічних шліфів Beta Grinder–Polisher (рис. 2.7), виробництва фірми Buehler; фотокамера Olympus F–320; ПК Asus X550VX.



Рисунок 2.2 – Стаціонарна установка для проведення спектрального аналізу SPECTROMAXx



Рисунок 2.3 – Електронний мікроскоп РЭМ-106И

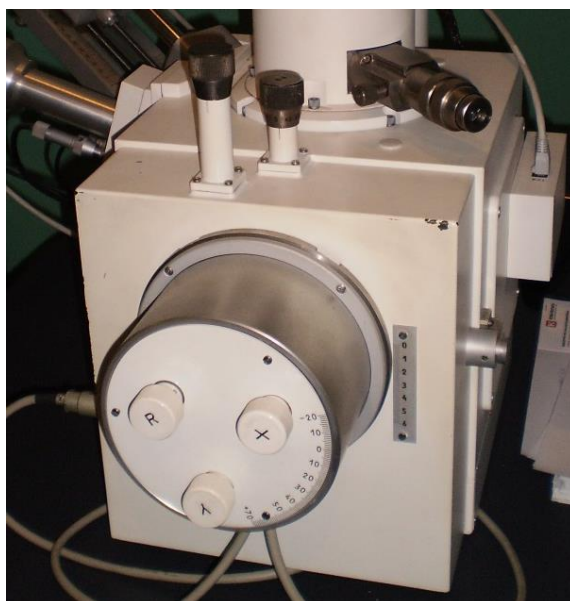


Рисунок 2.4 – Робоча камера електронного мікроскопу РЭМ-106И



Рисунок 2.5 – Пристрій для вимірювання мікротвердості ПМТ-3

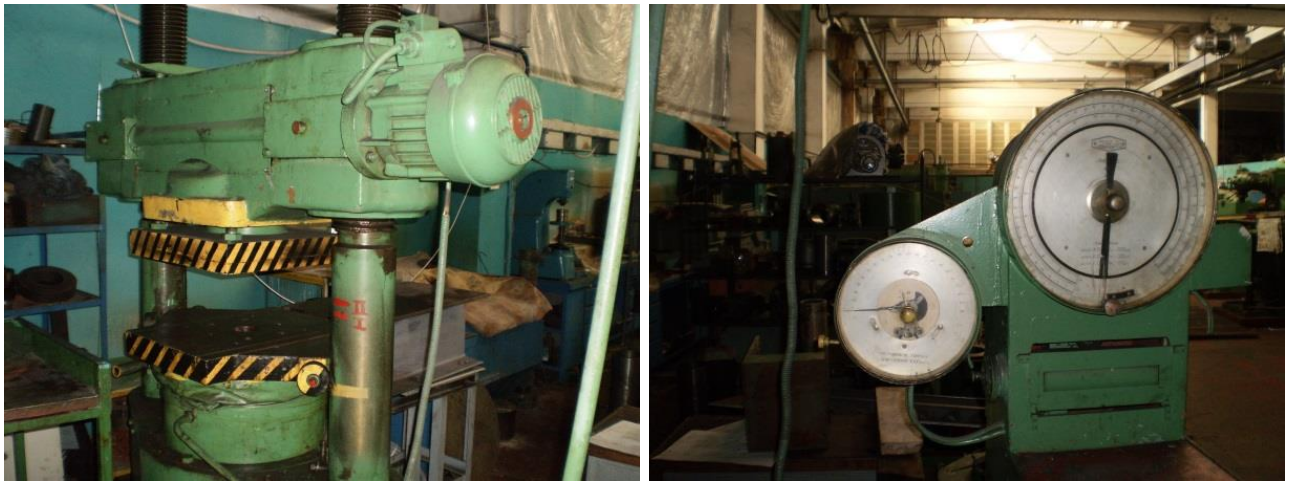


Рисунок 2.6 – Гідравлічний прес ПММ–200



Рисунок 2.7 – Установка для отримання металографічних шліфів Beta
Grinder–Polisher

Досліджувані сталі: сталь 12X15Г9НД (AISI 201); сталь 08X18Н10 (AISI 304); сталь 40X13 (AISI 420); сталь 110Г13Л (A 128).

2.3. Методи та дослідницькі пристрої

У дисертаційній роботі було розроблено та застосовано низку нових методів дослідження аустенітних сталей. Серед цих методів слід відзначити наступні: метод поперечного стиску матеріалу (рис. 2.8), метод спектрального аналізу досліджуваних марок аустенітної сталі, метод визначення кількості дислокацій на електронному мікроскопі, метод різання сталей з використанням МОР рослинного походження.

Поперечний стиск – метод деформування досліджуваного матеріалу, при якому зразок піддається стисненню в напрямку, перпендикулярному осі (рис. 2.8). При цьому деформація є більш об'ємною та рівномірною, що підтверджується дослідженнями мікротвердості в площі поперечного перерізу зразка. Також такий підхід забезпечує більшу кількість матеріалу для досліджень.

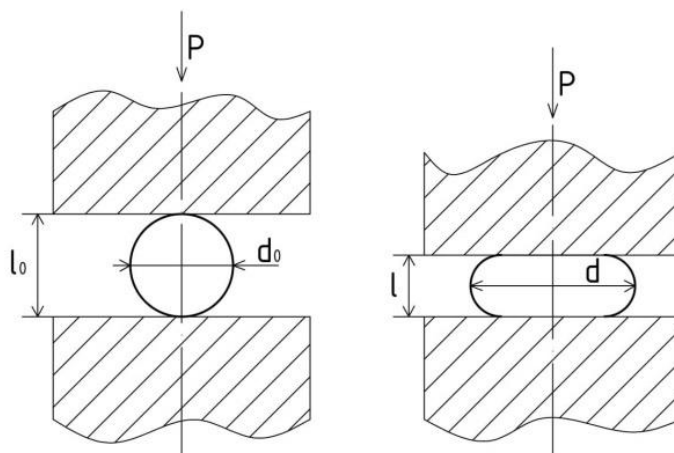


Рисунок 2.8 – Схема поперечного стиснення зразків

Спектральний аналіз – метод визначення фактичного хімічного складу досліджуваних марок сталі. Відбувається шляхом випаровування частинок металу за допомогою іскрового розряду, що проходить в середовищі захисного газу – аргону. Світлочутливі датчики фіксують проникність світлових променів через пари металу та визначають якісний та кількісний хімічний склад сталі (рис. 2.2).

Метод визначення кількості та густини дислокацій. Для цього зразки підготовлювали для дослідження на електронному мікроскопі РЕМ–106И. Після отримання якісних фотографій мікроструктури металу при збільшенні від $\times 2000$ до $\times 10000$ разів, виокремлювалася певна площа на фотографії та підраховувалася кількість дислокацій на зразках до та після деформації.

Метод різання аустенітних сталей з використанням МОР рослинного походження. Для підвищення оброблюваності аустенітних сталей в зону різання подавалися МОР рослинного походження, а саме: ріпакова, соняшникова та олія льону. Цей підхід дозволив більш, ніж в 2 рази знизити усадку стружки та довжину контакту стружки з передньою поверхнею різального інструменту.

2.4. Дослідження мікроструктури аустенітних сталей оптичною та електронною мікроскопією

Дослідження мікроструктури аустенітних сталей проводилося на оптичному мікроскопі МИМ–7 та установці Beta Grinder–Polisher (рис. 2.7). Це дозволяло отримати зображення поверхні металу зі збільшенням до $\times 1000$ разів. Електронний мікроскопі РЕМ–106И (рис. 2.3, 2.4) дозволяв вивчити мікроструктуру зі збільшенням до $\times 50000$ разів.

У оптичних мікроскопах зображення поверхні металу отримується в результаті відбивання світла від непротравлених зерен металу. Для цього слід виготовити шліфи та протравити їх відповідним травником.

При електронній мікроскопії шліф поміщався в камеру РЕМ–106И, з якої відкачувалося повітря до утворення розрідження, близького до вакууму.

Отримані зображення мікроструктури зберігалися на жорстких носіях комп'ютера.

2.5. Методи та техніка експериментальних досліджень

Для підтвердження фактичного хімічного складу досліджуваних сталей, було проведено спектральний аналіз зразків сталі.

Для цього було використано установку для спектрального аналізу SPECTROMAXx (рис. 2.2). Вимірювання проводилося не менше 10 разів у різних точках досліджуваного зразка. Визначення хімічного складу відбувається шляхом просвічування парів металу, що утворюються в результаті іскрового розряду між установкою та зразком. Зона іскрового розряду захищається інертним газом – аргоном. Світлочутливі датчики вимірюють відбивання світла від хімічних елементів, що знаходяться в парах металу, та визначають їхню кількість та найменування.

Як приклад, наведено дослідження сталі невідомої марки стволу танкової гармати танку Т-64 “Булат”, діаметром 125 мм та товщиною 30 мм (рис. 2.9). Було встановлено, що зразок має наступний хімічний склад: С – 0,50%; Si – 0,38%; Mn – 0,248%; P – 0,001%; S – 0,001%; Cr – 1,14%; Ni – 3,17%; Mo – 0,376%; Al – 0,0084%; Cu – 0,15%; Co – 0,0043%; Ti – 0,0056%; Nb – 0,0097%; V – 0,111%; W – 0,01%; Pb – 0,003%; B – 0,0005%; Sn – 0,001%; As – 0,0015%; Bi – 0,0035%; Ca – 0,0024%. Все інше – залізо. Таким чином, матеріал зразка відповідає марці сталі 50XH3MCA.

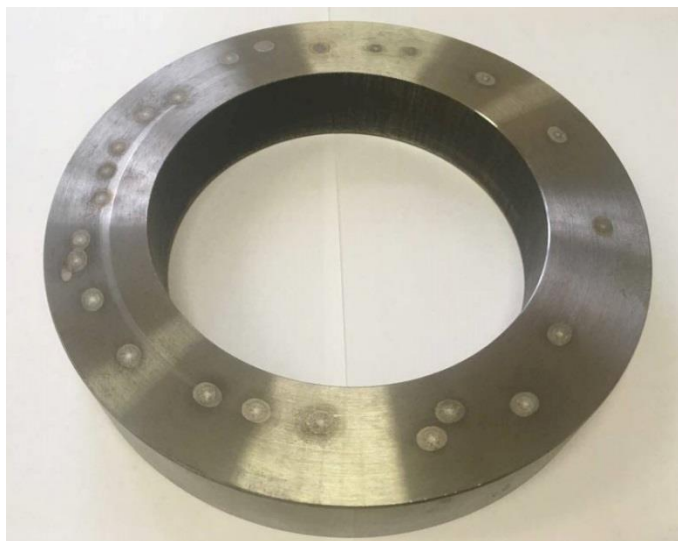


Рисунок 2.9 – Зразок сталі гармати танку “Булат”

Виготовлення шліфів для дослідження мікроструктури аустенітних сталей виконувалось наступним чином.

З кожної марки сталі вирізалися окремі фрагменти для подальшого виготовлення шліфів. Шліфи фіксувалися в тримачах та піддавалися шліфуванню на алмазно–абразивних кругах. Зернистість абразивних частинок змінювалась від 5 до 240 мкм. При кожній зміні розміру алмазно–абразивних частинок, зразок повертали на 90° для видалення рисок від попередньої обробки.

Наступним кроком було полірування шліфів на войлочних кругах з використанням алмазної паст. Отримана поверхня мала дзеркальну поверхню без рисок чи сторонніх дефектів.

Далі проводилося травлення поверхні шліфа для отримання зображення мікроструктури металу. Досліджувані сталі аустенітного класу піддавалися електро–хімічному травленню з використанням різних травників. Після травлення шліф промивали під струменем води, а поверхню шліфа протирали ватним диском, змоченим в спирті для видалення залишків травника.

Твердість зразків вимірювали за допомогою твердоміра ХПО–250. Вимірювання твердості відбувалося за методикою Віккерса. Одиниці твердості *HV*, МПа.

Зразок затискався між прижимною платформою та верхньою опорою. Вдавлювання здійснювалося при навантаженні 30 кг. Після цього на оптичній лінійці екрану пристрою вимірювалася довжина діагоналей відбитка. Отриманні дані переводилися в одиниці твердості відповідно до таблиць.

Мікротвердість зразків вимірювалася на мікротвердомірі ПМТ–3 (рис. 2.5) з навантаженням 20–200 гс ($0,2 - 2\text{ Н}$).

Проводилося мінімум 10 вимірювань для отримання точних даних по усьому перерізу зразків. Величину діагоналей відбитку рахували за допомогою рухомого окуляра. Отримані дані обчислювалися за відомими формулами.

Холодна пластична деформація проводилася на гідравлічному пресі ПММ–200 (рис. 2.6) за схемою поперечного стиснення (рис. 2.8).

Для стиснення зразків було виготовлено 2 пуансони зі сталі Х12Ф1, що були попередньо нагріті до температури 1030–1050 °С, загартовані у маслі та відпущені. Це дозволило досягти необхідної твердості у межах 58 – 60 HRC та достатньої пластичності для запобігання руйнувань при стисненні. Пуансони було відшліфовано з обох сторін на плоскошліфувальному верстаті.

Стиснення проводилося з використанням змащення – графітної пасти, яку наносили на робочі поверхні нижнього та верхнього пуансонів. Зразок круглої форми розміщували по центру нижнього пуансона.

ХПД проводилося при навантаженнях від 30 до 160 тс. Це дало можливість отримати деформацію зразків до 67%. Після ХПД зразок замінювали, а операції змащення та центрування зразків повторювали.

Різання проводилося за схемою вільного прямокутного різання на фрезерному верстаті (рис. 2.10). Це дозволяло відкинути вплив несуттєвих факторів на процес різання.



Рисунок 2.10 – Процес вільного прямокутного різання

Різець зі сталі Р6М5 затискався в патроні верстату, а зразок, установлений у лещатах, подавався на різець переміщенням столу. Геометричні параметри різця були наступними: ширина 10 мм, передній кут 15°, задній кут 6°, радіус округлення різальної кромки – 10 мкм. Швидкість різання – 26,5 м/год. Товщина зрізуваного шару 0,02 – 0,03 мм.

Досліди проводилися без змащення та з використанням різних МОР (індустріальне масло И-20, сульфозфрезол-Р, ріпакова і соняшникова олії та олія льону). З кожного зразка при різних умовах змащення було отримано по 5 стружок для подальших досліджень.

Отриманні елементи стружки фотографувалися на фоні вимірювальної лінійки (ціна поділки 0,5 мм) в режимі макрозйомки. Потім на фотографії за допомогою комп'ютерної програми наносилася лінія, яка повторювала форму стружки. Усадку стружки визначали шляхом порівняння довжини отриманої стружки до довжини зразка, з якого ця стружка була знята.

Довжину контакту стружки з передньою поверхнею різця визначали за допомогою мікроскопу МПБ-2.

Для визначення густини дислокацій у структурі металу було використано електронний мікроскоп РЕМ-106И. Отриманні фотографії (рис. 2.11) оброблювалися за допомогою комп'ютерної програми та вираховувалась фактична кількість дислокацій на одиницю площі. Потім пропорційно вираховувалася густина дислокацій для більшої площі металу.

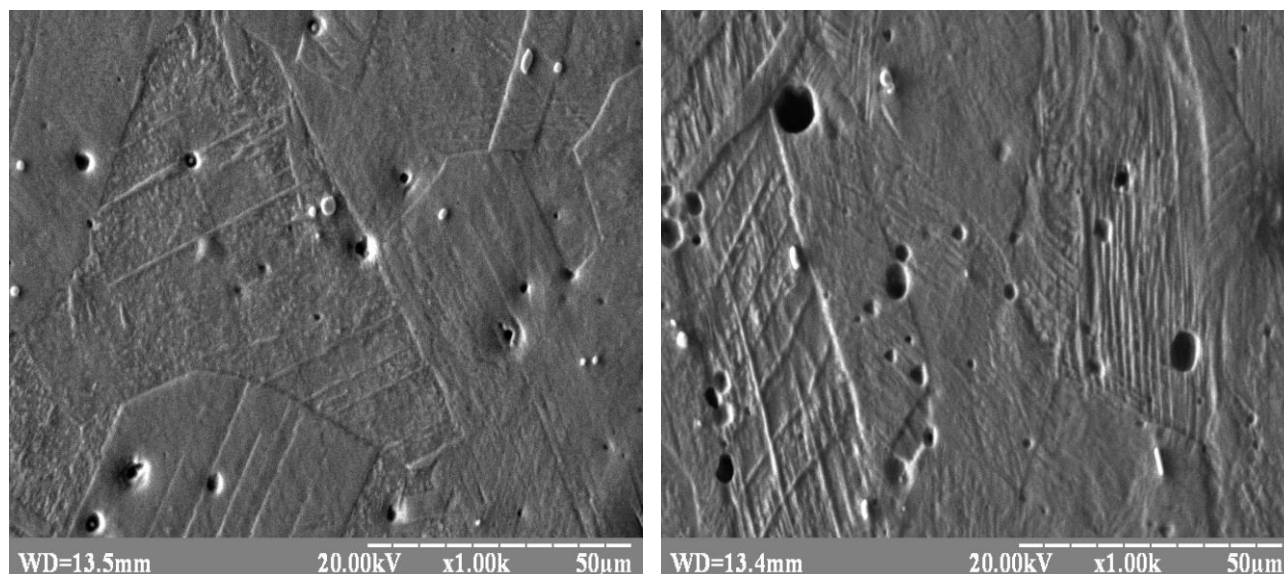


Рисунок 2.11 – Дослідження густини дислокацій на РЕМ-106И

2.6. Визначення фазового складу сталі при аустенітно–мартенситних перетвореннях

Дослідження проводились з використанням рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima IV (рис. 2.12). Технічні характеристики використовуваного в дифрактометрі джерела випромінювання, гоніометра, оптичної системи та детектора наведені в табл. 3. Прилад дозволяє визначати: кількісний та якісний фазовий склад досліджуваного матеріалу, період кристалічної ґратки, розмір областей когерентного розсіяння, ступінь деформації кристалічної ґратки, величину залишкових макронапружень методом $\sin^2\psi$, кристалографічну орієнтацію кристалів, ступінь кристалічності.

Метод аналізу – рентгеноструктурний фазовий аналіз. Дослідження зразків проведено в мідному випромінюванні ($\text{Cu}_{K\alpha} = 0,15418 \text{ нм}$). Напруга – 30 кВ; сила струму – 30 мА; ширина щілини, яка обмежує рентгенівський промінь – 10 мм. Для дослідження використано схему фокусування за Брегом–Брентано. Умови досліджень: досліджений інтервал кутів $2\Theta = 25\text{--}140^\circ$, крок зйомки – $0,04^\circ$, час витримки у точці – 2 с; тривалість зйомки одного зразка – 90 хв.



Рисунок 2.12 – Рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima IV

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima IV

Джерело випромінювання	Максимальна потужність	3 кВт
	Напруга на трубці	20 – 60 кВ
	Струм трубки	2 – 60 мА
	Матеріал анода	Cu або Co
	Розмір фокуса	0,4 x 12 мм
Гоніометр	Метод сканування	Θ_s / Θ_d зв'язані або Θ_s , Θ_d незалежні
	Радіус гоніометра	285 мм
	Діапазон кутів сканування 2Θ	від -3 до 162° (максимум)
	Мінімальний крок	$0,0001^\circ$
Оптична система	Щілини на вихідний пучок	Фіксовані або автоматично змінювані
	Щілини на дифрагований пучок	Фіксовані або автоматично змінювані
	Приймальні щілини	Фіксовані або автоматично змінювані
	Юстування оптичної системи	Автоматичне юстування трубки по висоті, гоніометра, оптики і детектора
	Монохроматор	Двохпозиційний графітовий кристал–монохроматор Cu–випромінювання
Детектор	Детектор	Сцинтиляційний лічильник

Аналіз отриманих рентгенівських спектрів та проведення кількісного та якісного фазового аналізу здійснено з використанням програмного забезпечення PDXL, міжнародної бази даних дифракції ICDD (PDF–2) та відкритої бази кристалографічних даних COD (додаток А).

Висновки до розділу 2

Проведено моделювання процесу різання аустенітних сталей після ХПД та з застосуванням МОР рослинного походження методом кінцевих елементів, що дозволяє встановити картину впливу факторів попереднього зміцнення та екологічно чистих мастил на процес стружкоутворення;

За способи впливу на оброблюваність аустенітних сталей (фактори) обрано три найголовніші: ХПД (HV , H_μ , МПа), екологічно чисті МОР рослинного походження та швидкість різання v (м/с); параметрами оптимізації при цьому служили коефіцієнт усадки стружки і повна довжина контакту останньої з передньою поверхнею інструменту. Ці параметри найповніше свідчать про оброблюваність аустенітних сталей, тобто служать мірилом оброблюваності.

Експериментальні дослідження виконано на наступних приладах, установках та обладнанні. Холодне пластичне деформування аустенітних сталей 12Х15Г9НД (AISI 201), 08Х18Н10 (AISI 304), 40Х13 (AISI 420), 110Г13Л (А 128) виконувалось за допомогою оригінального способу поперечного стиску на гідравлічному пресі ПММ 200; металографічні шліфи досліджувались на установці Beta Grinder–Polisher; мікротвердість та твердість експериментальних зразків вивчалась на приладах ПМТ–3 та ХПО–250; проведення дослідів з різання виконувалось методом вільного ортогонального різання різцем із сталі Р6М5 на верстатах моделей 6Н13П та 16К20 з використанням динамометра УДМ–600, «падаючого» різця та природньої термопари; стаціонарної установки для спектрального аналізу SPECTROMAXx; персонального комп'ютера ASUS X550VX; фотокамери Olympus F–320; густина дислокацій визначалась за допомогою електронного мікроскопа РЕМ–106И; фазовий склад досліджуваних сталей при аустенітно–мартенситних (феритних) перетвореннях досліджувався за допомогою рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima IV; в експериментах вивчалась дія екологічно чистих олій – льняної, соняшникової та ріпакової з протизносними та протизадирними присадками у порівнянні зі стандартним сульфофрезолом Р.

Результати розробки оригінальних методик та основних методів проведення досліджень опубліковано у роботах [8, 85, 88, 90, 92, 93, 94].

РОЗДІЛ 3.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ

3.1. Перевірка математичної моделі на адекватність

Для перевірки математичної моделі процесу різання аустенітних сталей на адекватність було внесено значення параметрів оптимізації, отриманих при експериментальних дослідженнях незміцнених зразків.

Використовувалися наступні рівні факторів: $x_1 = 220 \text{ HV}$; $x_2 = \text{сухе тертя}$; $x_3 = 5 \text{ м/хв}$.

У нашому випадку ми маємо нелінійну модель, в якій один фактор залежить від рівня, на якому знаходиться інший фактор. Використовувалася матриця повного факторного експерименту типу 2^3 з нелінійною залежністю між факторами.

Рівняння математичної моделі, як уже відзначалось вище, буде таким

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

Значення параметрів оптимізації отриманих експериментальним шляхом:

$$y_1 = 4,18; y_2 = 4,41; y_3 = 4,27; y_4 = 4,22; y_5 = 4,47; y_6 = 4,28; y_7 = 4,33; y_8 = 4,35.$$

Коефіцієнти знаходимо за формулою [14]:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i, \quad (3.1)$$

де $j = 0, 1, \dots, k$.

Знаходимо коефіцієнти рівняння:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{(+1)y_1 + (+1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4 + (+1)y_5 + (+1)y_6 + (+1)y_7 + (+1)y_8}{8} \\ &= \frac{4,18 + 4,41 + 4,27 + 4,22 + 4,47 + 4,28 + 4,33 + 4,35}{8} = 4,31; \end{aligned}$$

$$b_1 = \frac{(-1)y_1 + (+1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4 + (-1)y_5 + (+1)y_6 + (-1)y_7 + (+1)y_8}{8}$$

$$= \frac{-4,18 + 4,41 - 4,27 + 4,22 - 4,47 + 4,28 - 4,33 + 4,35}{8} = 0,00125;$$

$$b_2 = \frac{(-1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4 + (-1)y_5 + (-1)y_6 + (+1)y_7 + (+1)y_8}{8}$$

$$= \frac{-4,18 - 4,41 + 4,27 + 4,22 - 4,47 - 4,28 + 4,33 + 4,35}{8} = -0,02125;$$

$$b_3 = \frac{(+1)y_1 + (-1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4 + (-1)y_5 + (+1)y_6 + (+1)y_7 + (-1)y_8}{8}$$

$$= \frac{4,18 - 4,41 - 4,27 + 4,22 - 4,47 + 4,28 + 4,33 - 4,35}{8} = -0,06125;$$

$$b_{12} = \frac{(+1)y_1 + (-1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4 + (+1)y_5 + (-1)y_6 + (-1)y_7 + (+1)y_8}{8}$$

$$= \frac{4,18 - 4,41 - 4,27 + 4,22 + 4,47 - 4,28 - 4,33 + 4,35}{8} = -0,00875;$$

$$b_{13} = \frac{(-1)y_1 + (-1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4 + (+1)y_5 + (+1)y_6 + (-1)y_7 + (-1)y_8}{8}$$

$$= \frac{-4,18 - 4,41 + 4,27 + 4,22 + 4,47 + 4,28 - 4,33 - 4,35}{8} = -0,00375;$$

$$b_{23} = \frac{(-1)y_1 + (+1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4 + (+1)y_5 + (-1)y_6 + (+1)y_7 + (-1)y_8}{8}$$

$$= \frac{-4,18 + 4,41 - 4,27 + 4,22 + 4,47 - 4,28 + 4,33 - 4,35}{8} = 0,04375;$$

$$b_{123} = \frac{(+1)y_1 + (+1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4 + (-1)y_5 + (-1)y_6 + (-1)y_7 + (-1)y_8}{8}$$

$$= \frac{4,18 + 4,41 + 4,27 + 4,22 - 4,47 - 4,28 - 4,33 - 4,35}{8} = -0,04375.$$

Знаходимо помилку відтворюваності

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n y_q; \quad (3.2)$$

$$\bar{y} = \frac{4,18 + 4,41 + 4,27 + 4,22 + 4,47 + 4,28 + 4,33 + 4,35}{8} = 4,31.$$

Дисперсію s^2 знаходимо формулою [14]:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2, \quad (3.3)$$

де $(n - 1)$ – число ступенів свободи, що рівне кількості дослідів, мінус одиниця.

$$s^2 = \frac{(y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + (y_3 - \bar{y})^2 + (y_4 - \bar{y})^2 + (y_5 - \bar{y})^2 + (y_6 - \bar{y})^2 + (y_7 - \bar{y})^2 + (y_8 - \bar{y})^2}{n-1};$$

$$s^2 = \frac{0,0651}{7} = 0,0093.$$

Вираховуємо середнє квадратичне відхилення

$$s = \sqrt{0,0093} = 0,0964.$$

Виключаючи з експериментальних даних грубі помилки, використовуємо критерій Стюдента [115]

$$\frac{y - \bar{y}}{s} \geq t$$

Значення t беремо з таблиці t -розподілення Стюдента. Дослід вважається бракованим, якщо експериментальне значення критерію t по модулю більше табличного значення.

Взявши найбільше значення різниці між отриманим та середнім значенням параметра оптимізації, що рівне 0,16, та розділивши його на значення квадратичної помилки – 0,0964, отримуємо 1,66, що є менше, ніж табличне значення критерію Стюдента ($t = 2,31$ для $N=8$ та при рівні значущості $P=0,05$).

Далі розраховуємо однорідність дисперсій паралельних дослідів за критерієм Кохрена [124]:

$$G_p = \frac{s_{i_{max}}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2} = \frac{0,0256}{0,0964} = 0,266.$$

Розрахункове значення критерію зрівнювали з табличним для ступенів вільності: чисельника $f_1 = n - 1$, знаменника $f_2 = N$ і, відповідно за вибраним рівнем значущості, $\alpha = 0,05$:

$$G_{\text{табл}} = 0,319 > G_p = 0,266.$$

Звідси дисперсія відтворюваності:

$$s^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2 = \frac{0,0964}{8} = 0,012.$$

Похибку експерименту визначаємо за рівнянням:

$$s(y) = \sqrt{s^2(y)} = \sqrt{0,012^2} = 1,2\% < 4,0\%.$$

Після визначення всіх коефіцієнтів, рівняння математичної моделі набуває вигляду:

$$y = 4,31 + 0,00125x_1 - 0,02125x_2 - 0,06125x_3 - 0,00875x_1x_2 - 0,00375x_1x_3 + 0,04375x_2x_3 - 0,04375x_1x_2x_3.$$

Для повного факторного експерименту похибки всіх коефіцієнтів рівні між собою визначаються за формулою:

$$s(b_i) = \frac{s(y)}{\sqrt{N}} = \frac{1,2}{\sqrt{8}} = 0,424.$$

Коефіцієнт є значущим, якщо його абсолютна величина більша від половини довжини довірчого інтервалу.

Визначаємо довірчий інтервал довжиною Δb за формулою:

$$\Delta b_i = t_{\text{кр}} s(b_i) = 2,31 \cdot 0,424 = 0,98,$$

де $t_{\text{кр}}(0,05;8) = 2,31$ – критичне значення критерію Стюдента 5%-го рівня значущості.

Для перевірки на адекватність результатів експерименту у знайденому рівнянні досить оцінити відхилення, що розраховані за рівнянням регресії та результатами експерименту в різних точках факторного простору.

Розсіяння результатів експерименту відповідно до рівняння регресії характеризуються залишковою дисперсією адекватності за заданого $f_{\text{ад}}$.

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{s^2(y)}{f_{\text{ад}}}.$$

Перевірка гіпотези щодо адекватності рівняння виконувалась за критерієм Фішера.

Модель адекватна, якщо виконується умова [124]:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s^2(y)} \leq F(0,05; f_{ад}; f_N),$$

де $F(0,05; f_{ад}; f_N) = 4,46$ – критерій Фішера за 5%-го рівня значущості;

$$s_{ад}^2 = \frac{1}{8 - 6} 0,012 = 0,06;$$

$$f_{ад} = N - z = 8 - 6 = 2.$$

Тоді

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s^2(y)} = \frac{0,06}{0,012} = 0,5.$$

Оскільки $F = 0,5 < 4,46$, то рівняння математичної моделі вважається адекватним, тому що виконується.

3.2. Вплив ХПД на структурні перетворення в аустенітних сталях

Поліпшенню оброблюваності аустенітних сталей може сприяти перетворення парамагнітного стану матеріалу у феромагнітний від дії холодної пластичної деформації. При цьому в результаті досить високих швидкостей (без інкубаційного періоду) у наших експериментах відбувалось бездифузійне перетворення (аустеніту в мартенсит) при зростанні густини дислокацій до 10^{11} – 10^{12} см⁻¹. Оскільки мартенсит у твердому розчині містить значно меншу кількість вуглецю, ніж аустеніт, ґратка першого (ОЦК) стає спотвореною, пересиченою вуглецем і перетворюється з кубічної у тетрагональну.

Слід відзначити, що у аустенітних сталях поряд з мартенситом ще залишався неперетворений аустеніт, кількість якого (у %) залежала від величини деформації ХПД, вуглецю та легувальних елементів. У доевтектоїдних аустенітних сталях (системи «вуглець–хром–нікель») кількість залишкового аустеніту невелика, а у заевтектоїдній сталі 110Г13Л ця кількість у залежності від деформації може сягати 20–30%. Таким чином, у останньому випадку перетворення парамагнітного матеріалу у феромагнітний має дещо слабший ефект у сенсі поліпшення оброблюваності.

За теорією феромагнетизму між структурою металу і магнітними властивостями існує тісний зв'язок, який проявляється у магнітних характеристиках металу. Для магнітного структурного аналізу найбільш цікавим є коерцитивна сила, залишкова намагніченість, намагніченість насичення та індуктивна дія (магнітна індукція).

Методи прямих вимірів коерцитивної сили трудомісткі. Тому нами у роботі використовувалось поле залишкової намагніченості. Між цими характеристиками існує прямий зв'язок. Експериментальна установка (рис. 3.1) включала постійний магніт, що приводився у контакт з відповідною ділянкою зразка аустенітної сталі у початковому та у деформованому стані. Після відведення магніту, ділянка дослідного зразка виявлялась намагніченою до того чи іншого ступеня. Напруженість зовнішнього поля біля створеного магнітом точкового поля вимірювалась мініатюрними зондами, тобто застосовувався відомий ферозондовий метод.

Коерцитивна сила H_c , ерстеди, у наших дослідях визначалась за експериментальною залежністю:

$$H_c = 8,3H_i \frac{a^3}{\pi r^2},$$

де H_i – напруженість залишкового магнітного поля, ерстед;

a – відстань ферозонда від зразка, мм;

r – радіус плями зразка, що вимірювалась, мм.

Коерцитивна сила досліджувалась за допомогою стаціонарного автоматичного коерцитиметра ИКС8–3 (рис. 3.1) та магнітна індукція переносним мілітеслометром ТПУ (рис. 3.2).



Рисунок 3.1 – Стационарний автоматичний коерцитиметр ИКС8–3



Рисунок 3.2 – Переносний мілітеслометр ТПУ

Результати експериментів подано на графіках (рис. 3.3 та рис. 3.4)

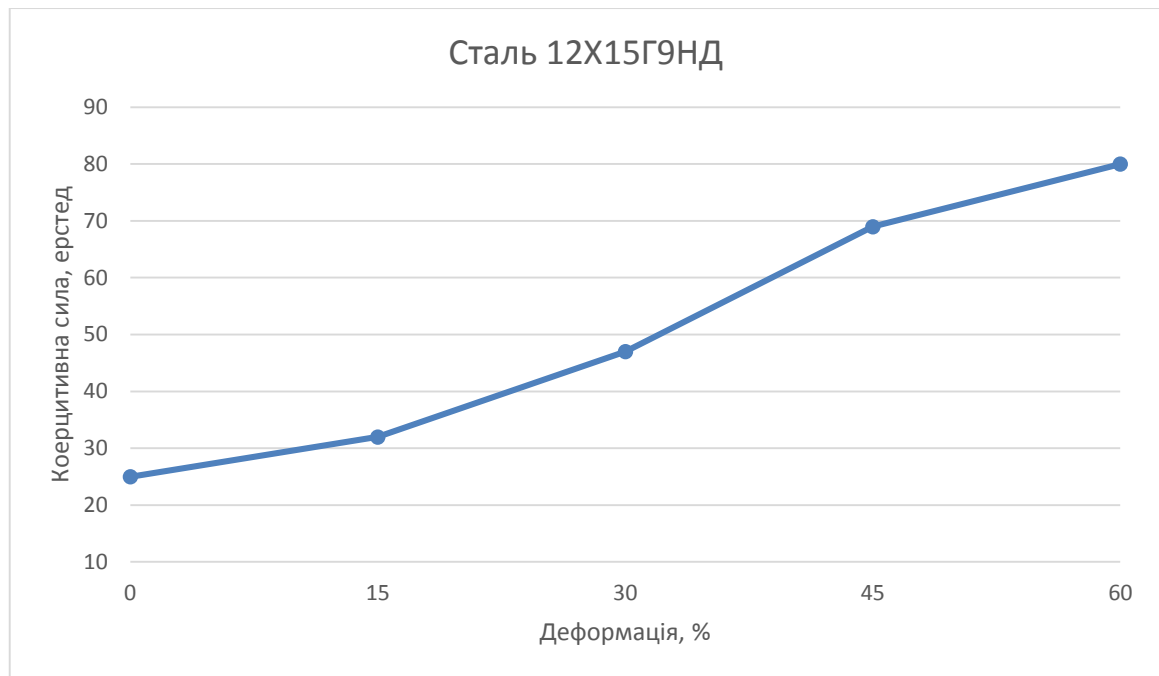


Рисунок 3.3 – Графік залежності зміни напруженості магнітного поля від ступеню деформації сталі 12Х15Г9НД



Рисунок 3.4 – Графік залежності зміни магнітної індукції від ступеню деформації сталі 12Х15Г9НД

Як відомо, точка К'юрі є границею між парамагнітним та феромагнітним станом речовини. Тому, у першому випадку немає сенсу проводити магнітний структурний аналіз. Навпаки, у другому випадку такий аналіз слід виконувати, оскільки, як вказувалось вище, між структурою металу і магнітними властивостями існує тісний зв'язок.

Магнітна металографія заснована на взаємодії дрібних феромагнітних частинок безпосередньо із «магнітними зарядами» намагніченості феромагнітних фаз і полягає у наступному. Металографічний шліф, що готувався нами на установці (рис. 2.7), покривався тонким шаром магнітної пасти, яка вміщала дрібні близькодійучі частки. Потім цей шар відмивався для виявлення магнітного узору і досліджувався на оптичному мікроскопі. Утворення і проявлення прихованого зображення розподілу магнітних зарядів засновано на різному зчепленні частинок з поверхнею шліфа. Частинки, що потрапили на «магнітні заряди», добре тримались на останніх силами зчеплення. У той же час там, де не було таких зарядів, не було і сил зчеплення. В результаті частки магнітної пасти легко відмивались, наприклад, мильною піною.

Оскільки холодна пластична деформація аустенітних сталей сприяє перетворенню немагнітного аустеніту у магнітні мартенсит або ферит, то найкращим є саме магнітно–металографічний метод. Звичайне ж хімічне травлення практично не дає уявлень про кількість α -фази.

На рис. 3.5 подано магнітну мікрофотографію досліджуваної контрольної феритної сталі 40X13 (AISI 420) у незміцненому стані. Світлі ділянки на мікрофотографії – це аустеніт, а темні – ферит. На рис. 3.6 наведено магнітну мікрофотографію холодно деформованої сталі 12X15Г9НД (AISI 201). Тут видно α -фази на площинах ковзання в середині зерен. Ці площини виникають у результаті перетворень $\gamma \rightarrow \alpha$ при дії ХПД. Рис. 3.7 дає уявлення про фазовий склад граничних зон, що неможливо при звичайному електрохімічному травленні. Тому магнітна металографія особливо важлива для жароміцних аустенітних сталей системи Fe – Cr – Mn.

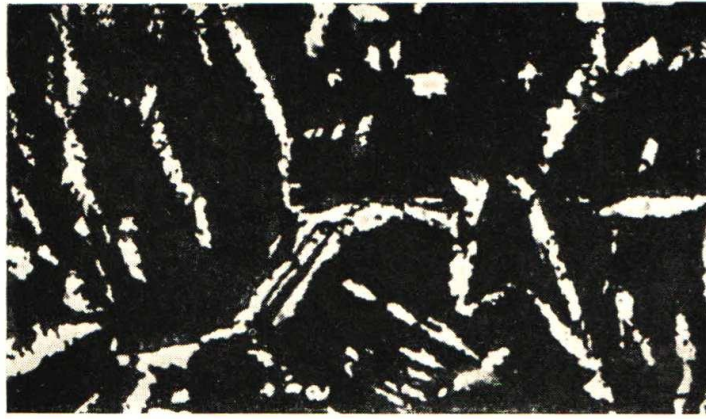


Рисунок 3.5 – Магнітна мікрофотографія структури сталі 40X13 (AISI 420) у незміцненому стані. x250



Рисунок 3.6 – Магнітна мікрофотографія ХПД – перетворення сталі 12X15Г9НД (AISI 201) площинами ковзання і границями зерен. x250



Рисунок 3.7 – Магнітна мікрофотографія сталі 12X15Г9НД (AISI 201) у незміцненому стані. Видно мікроструктуру границь зерен. x1000

На рис. 3.8 подано залежність перетворень аустеніту у мартенсит від величини холодної пластичної деформації.

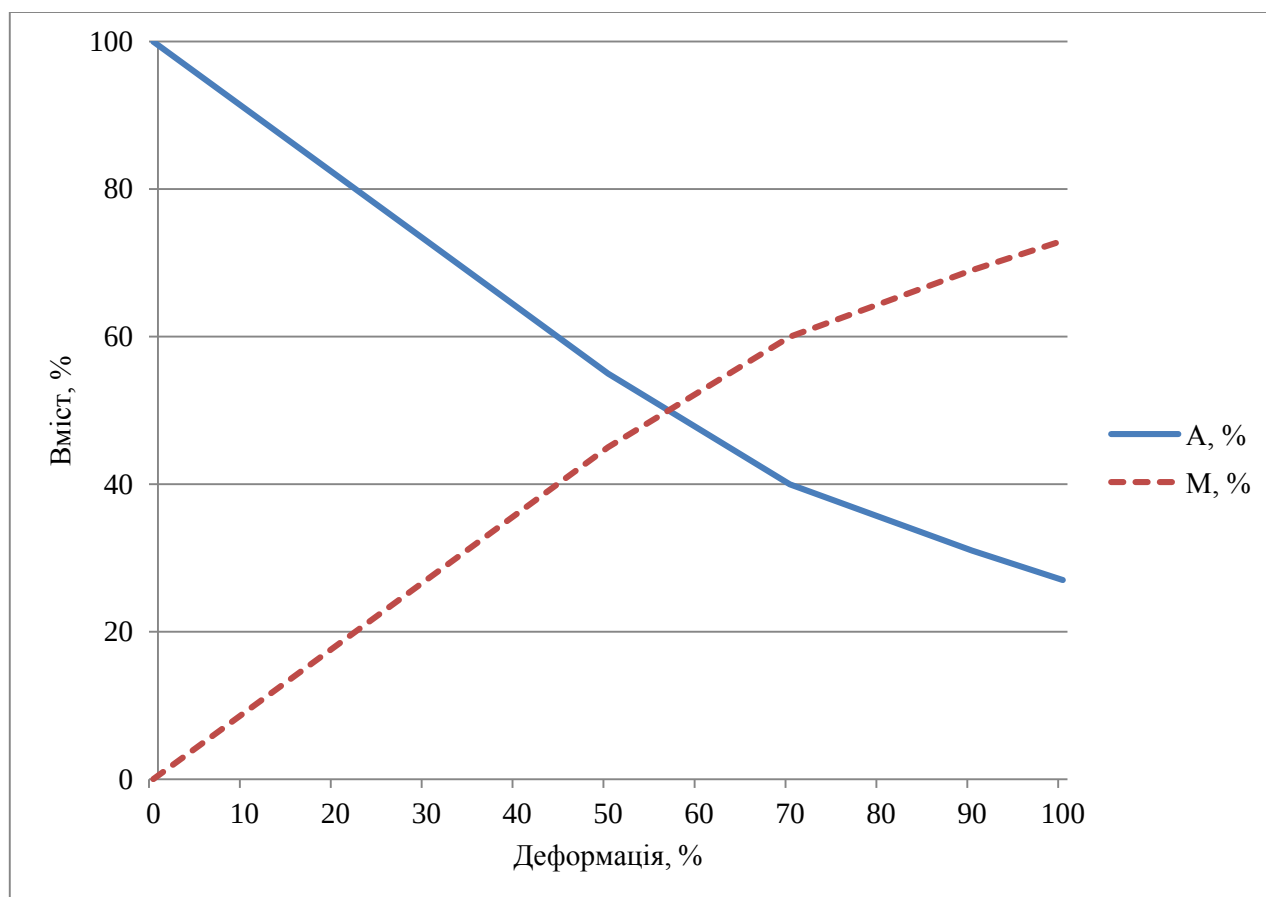


Рисунок 3.8 – Зміна фазового складу сталі 12Х15Г9НД при аустенітно-мартенситних перетвореннях у залежності від величини холодної пластичної деформації ε . А – аустеніт; М – мартенсит

Крім того між механічними та магнітними властивостями аустенітних сталей існують кореляційні залежності від дії ХПД, тобто при виникненні α -фази, що підтверджено також іншими дослідниками [139].

Отже, холодне пластичне деформування з деформаціями до 90%, у процесі котрого відбувається фазове структурне перетворення $\gamma \rightarrow \alpha'$, тобто аустенітні сталі частково отримують феромагнітні властивості, сприяє поліпшенню оброблюваності

3.3. Вибір екологічно чистої мастильно–охолоджувальної рідини

Рослинні масла є складними сумішами ефірів, головним чином моно–, ди– і особливо тригліцеридів насичених і ненасичених високомолекулярних жирних кислот з домішками цих же вільних кислот. На змащувальну здатність рослинних масел позитивно впливають присутні в них фосфатиди.

Рослинні масла характеризуються високою змащувальною здатністю. Хімічна структура гліцерину має властивості ефективного захисту від зносу. Молекулярні зв'язки цієї речовини між поверхнею металу та натуральними ефірами значно сильніші, ніж сили адгезії, що діють між мінеральним маслом та поверхнею металу. При цьому зносостійка плівка при підвищених навантаженнях зберігається.

Для покращення процесу обробки аустенітних сталей, а саме, зменшення сил різання, температури, усадки стружки та довжини повного контакту стружки з різцем, у поєднанні з попереднім ХПД використовувалися МОР рослинного походження. Було проведено експерименти з різними екологічно чистими МОР, серед яких: ріпакова олія, олія льону та соняшникова олія. В порівнянні з класичними МОР – сульфозфрезолом Р та мінеральним маслом И–20, отримано зменшення сил різання на 10%, усадки стружки та довжини контакту на 15–20%. Це свідчить про кращі мастильно–охолоджуючі властивості даних МОР рослинного походження.

Ріпакова олія – прозора, олієподібна рідина від жовтого до коричневого кольору, зі слабким горіховим запахом та приємним смаком, до складу якої входить комплекс природних кислот: ліноленова, олеїнова, ерукова (35–40%), лінолева (10–13%).

Приклади використання ріпакового масла:

- миловаріння, текстильна та шкіряна промисловості, виробництво оліф;
- екологічно чисте ріпакове масло для запобігання зносу та підвищення ефективності бурів для усіх видів буріння;

– нерафіноване рідке ріпакове масло (із зерен ріпаку) використовується в якості мастильно–охолоджуючої речовини при роботі металообробних верстатів;

– мастильно–охолоджуюча рідина на основі ріпакового масла зі зміненим хімічним складом (добавки інгібіторів корозії та антиоксидантів) для обробки чорних та кольорових металів.

Олія льону – прозора, олієподібна речовина від золотистого до коричневого кольору, до складу якої входить комплекс природних кислот: ліноленова (41–61%), лінолева (15–30%), олеїнова (13–29%).

Таблиця 3.1 – Фізико–механічні характеристики МОР

Характеристики	Назва			
	Ріпакова олія	Олія льону	Соняшникова олія	Мінеральне масло МР–7
ДСТУ	53457–2009	ГОСТ 5791–81	52465–2005	01445–88
Кислотне число, мг КОН/г	6,0	5,0	6,0	1,2
Масова частка нежирових домішок, %	0,20	0,05	0,20	0,04
Масова частка фосфору, %	2,0	0,90	0,80	–
Масова частка води та летких речовин, %	0,30	0,20	0,30	–
Перекисне число, ммоль/кг	10	–	10	–
Температура спалаху, °С	225	240	225	228
Густина, кг/м ³	915	935	925	850
Температура застигання, °С	0 – -10	-8 – -27	-16 – -19	-30 – -40
Кінематична в'язкість, м ² /сек	87,2 x 10 ⁻⁶	15,5 x 10 ⁻⁶	60,6 x 10 ⁻⁶	32,3 x 10 ⁻⁶

Масло льону знаходить широке застосування у промисловості. Воно використовується при виробництві оліф, лаків, фарб, рідких сикативів та

алкідних смол, а також в технічних сферах – поліграфія, фармацевтика, авіаційна, металургійна та атомна промисловість.

Соняшникова олія — прозора, олієподібна рідина від світло-жовтого до жовтого кольору, зі слабким своєрідним запахом та приємним смаком, до складу якої входить комплекс природних кислот: ліолева (66%), олеїнова (21,3%), пальмітинова (6,4%), арахідинова (4,0%), стеаринова (1,3%) та біхінова (0,8%). Основними напрямками застосування соняшникової олії в промисловості є: виготовлення консервів, миловаріння та лакофарбові рідини.

Для оцінки ефективності МОР рослинного походження було проведено серію експериментів по виявленню впливу МОР на процес вільного ортогонального різання досліджуваних сталей марок 12Х15Г9НД, 08Х18Н10, 40Х13 та 110Г13Л, різцем із сталі Р6М5 з переднім кутом $\gamma = 15^\circ$ та швидкістю 0,2 м/с з товщиною зрізу 0,03 мм. Тобто цей вид сталей належить до аустенітних (крім сталі 40Х13), які є важкооброблюваними. Як МОР використовувались сульфозфрезол Р, три види олій (ріпака, льону та соняшнику). Для порівняння різання здійснювалось також без МОР. Попереднє ХПД виконувалось за методом поперечного об'ємного стиску.

Результати експериментів наведені в таблиці 3.2.

Показниками оброблюваності сталі різальним протягуванням служили коефіцієнт усадки стружки ζ та повна довжина контакту c стружки на передній поверхні зуба.

Аналіз результатів експериментів показує, що всі види олій дають приблизно однакові результати щодо поліпшення оброблюваності аустенітних сталей. Тому у подальшому, керуючись вартістю олій, вибираємо найдешевшу – ріпакову. Порівняння цієї олії з найпоширенішим традиційним для процесів різання, що розглядаються, сульфозфрезолом Р, дало наступні результати. Дія середовища при різанні аустенітної сталі 12Х15Г9НД знижує коефіцієнт усадки стружки на 25%, а повної довжини контакту – на 34%. При обробці аустенітної сталі 08Х18Н10 ці показники відповідно такі: зниження ζ на 24%, а c – на 34%. Обробка зносостійкої аустенітної сталі 110Г13Л характеризується наступними

результатами: зменшення коефіцієнта усадки стружки на 16%, а повної довжини контакту – на 22%. Різання контрольної марки феритної нержавіючої сталі 40X13 також показало поліпшення оброблюваності: ζ на 21% і c на 29%.

Таблиця 3.2 – Вплив виду МОР на усадку стружки ζ та повну довжину контакту стружки з передньою поверхнею інструмента c

Марка сталі	Вид ХПД	Мастильно–охолоджуюча рідина (МОР)									
		Без МОР		Сульфо-фрезол Р		Ріпакова олія		Олія льону		Соняшникова олія	
		ζ	c , мм	ζ	c , мм	ζ	c , мм	ζ	c , мм	ζ	c , мм
12X15Г9НД (AISI 201)	Незміцнене $HV = 3,7$ ГПа	3,91	0,19	2,85	0,12	2,34	0,09	2,44	0,10	2,36	0,09
	Незміцнене $HV = 4,96$ ГПа	3,22	0,14	2,68	0,11	2,15	0,08	2,17	0,08	2,28	0,08
08X18Н10 (AISI 304)	Незміцнене $HV = 2,32$ ГПа	4,19	0,22	2,91	0,12	2,41	0,09	2,50	0,10	2,43	0,10
	Незміцнене $HV = 3,85$ ГПа	3,61	0,17	2,76	0,11	2,25	0,08	2,26	0,08	2,36	0,09
40X13 (AISI 420)	Незміцнене $HV = 2,14$ ГПа	4,64	0,25	3,15	0,14	2,66	0,11	2,70	0,11	2,68	0,11
	Незміцнене $HV = 3,15$ ГПа	3,90	0,19	3,00	0,13	2,47	0,10	2,46	0,10	2,58	0,10

110Г13Л (А 128)	Незміц- нене <i>HV</i> =2,05 ГПа	5,13	0,29	3,75	0,18	3,31	0,15	3,35	0,15	3,36	0,15
	Незміц- нене <i>HV</i> =3,85 ГПа	4,49	0,24	3,56	0,17	3,13	0,14	3,15	0,14	3,25	0,14

Отже, використання сучасних МОР на рослинній основі є потужним засобом поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей.

Рослинні МОР, зокрема ріпакову олію при протягуванні слід використовувати з відомими протизадирними та протизносними присадками.

Здійснивши моніторинг цін різних МОР, було визначено, що найбільш економічно доцільною є ріпакова олія (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Роздрібні на гуртові ціни МОР

Назва МОР	Ціна за 1 літр, грн*	Ціна за 1 тону, грн*
Сульфозфрезол МР-7	47	38000
Масло И-20	31	27200
Ріпакова олія	18	16500
Олія льону	52	22500
Соняшникова олія	25	21700

* – ціни вказані на І квартал 2018 року.

3.4. Явища у процесі різання аустенітних сталей

У процесі експериментального дослідження вивчалась дія попереднього ХПД, екологічно чистої МОР і швидкості різання на явища при різанні

аустенітних сталей. Всі експерименти було проведено при обробці незміцнених, попередньо зміцнених до деформацій $\varepsilon = 40\%$ і 67% аустенітних сталей 3-х марок 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18Н10 (AISI 304) та 110Г13Л (A128) при швидкостях різання 5–50 м/хв в умовах МОР на основі ріпакової олії. Вище було показано, що ця МОР є оптимальною. Процес різання був вільним ортогональним, передній кут γ і товщина зрізу s_z , були постійними, відповідно $\gamma = 15^\circ$, $s_z = 0,03$ мм, а інструментом служив різець із швидкорізальної сталі Р6М5 з плоскою передньою поверхнею.

Середня температура різання, яку було виміряно методом природної термопари, була нижчою при різанні сталей, попередньо зміцнених холодною деформацією, на $30\text{--}50^\circ\text{C}$ (рис. 3.9).

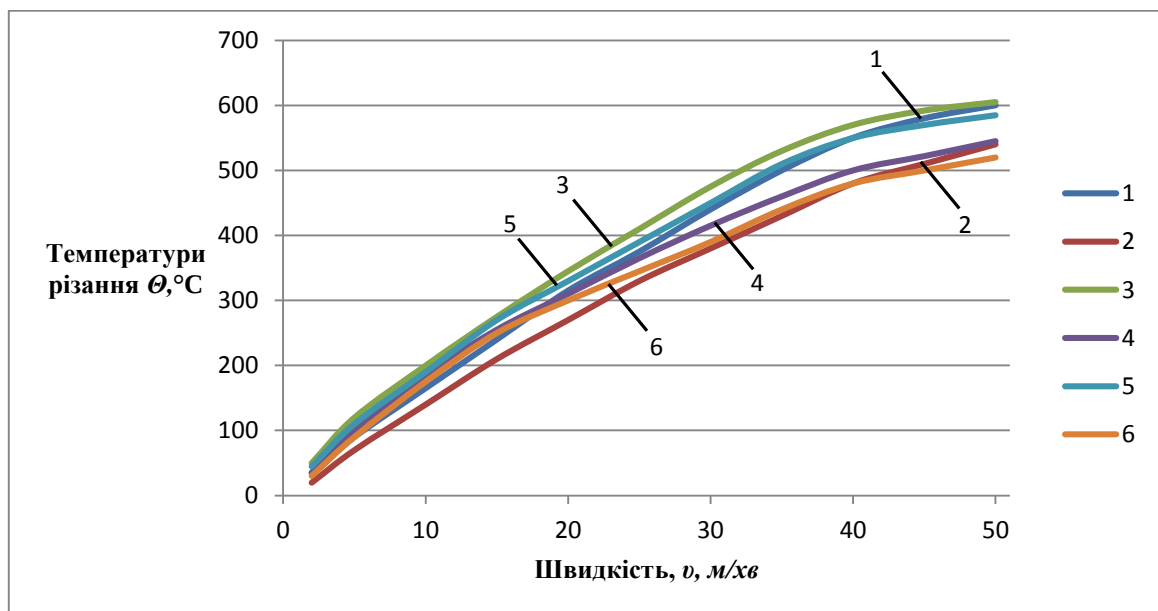


Рисунок 3.9 – Залежності температури різання Θ від швидкості при вільному ортогональному різанні сталей 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18Н10 (AISI 304), 110Г13Л (A128) у незміцненому (твердість відповідно 1 – $HV=385$; 3 – $HV=220$; 5 – $HV=210$) та після попередньої обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 50\%$ (твердість відповідно 2 – $HV=520$; 4 – $HV=320$; 6 – $HV=510$)

Таким чином, попередня обробка холодною пластичною деформацією за методом поперечного стиску викликає зниження середньої температури різання на $30\text{--}50^\circ\text{C}$.

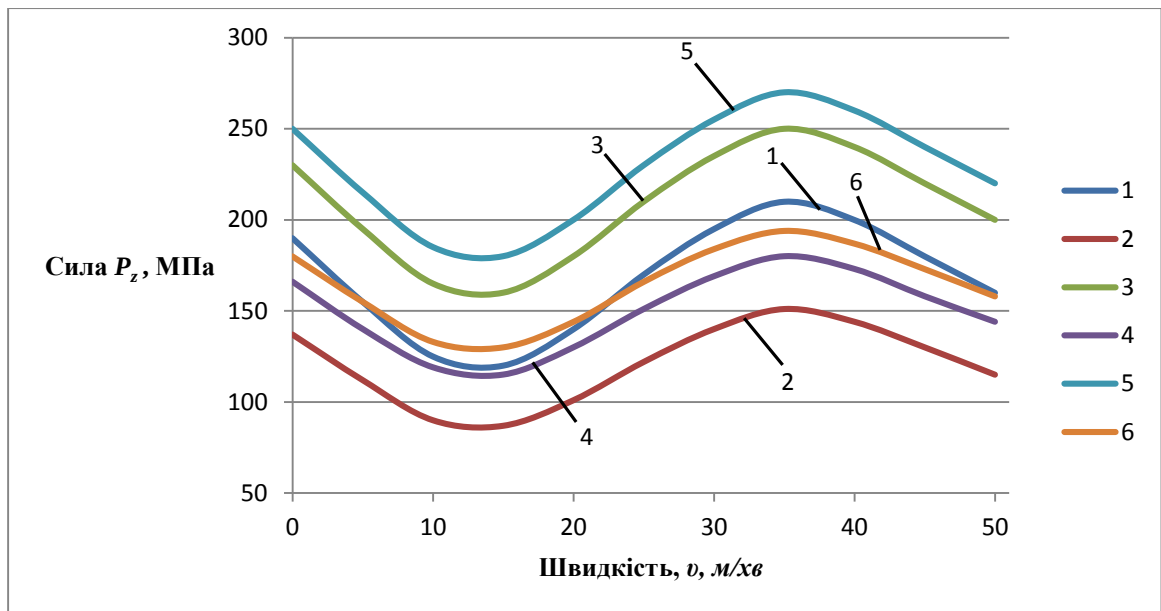


Рисунок 3.10 – Залежності складової P_z сили різання від швидкості при вільному ортогональному різанні сталей 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18Н10 (AISI 304), 110Г13Л (A128) у незміцненому (твердість відповідно 1 – $HV=385$; 3 – $HV=220$; 5 – $HV=210$) та після попередньої обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 50\%$ (твердість відповідно 2 – $HV=520$; 4 – $HV=320$; 6 – $HV=510$)

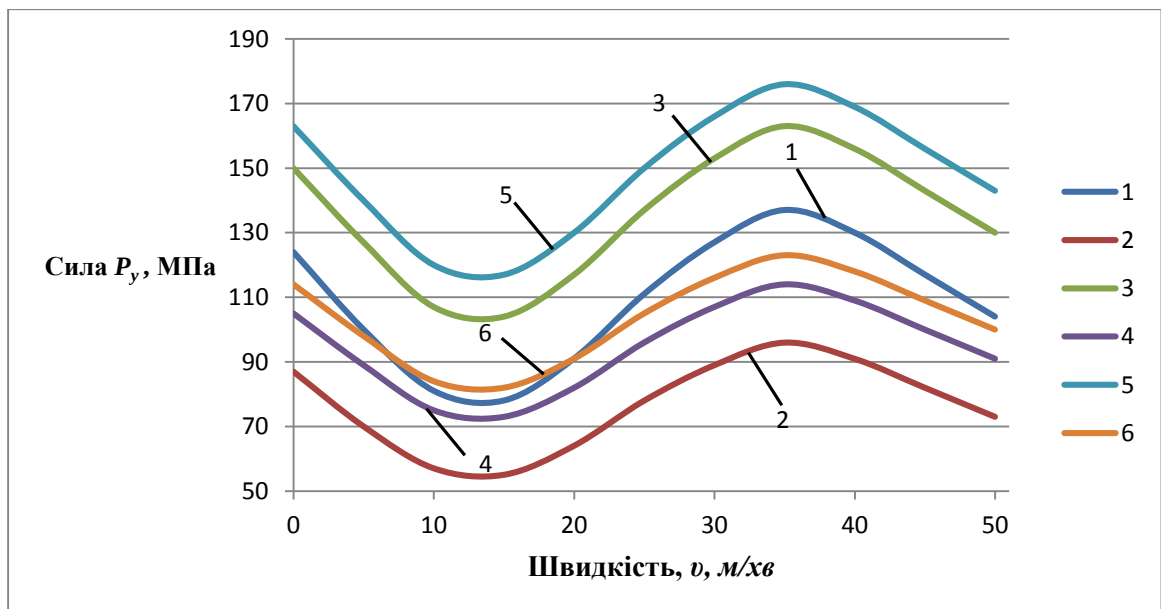


Рисунок 3.11 – Залежності складової P_y сили різання від швидкості при вільному ортогональному різанні сталей 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18Н10 (AISI 304), 110Г13Л (A128) у незміцненому (твердість відповідно 1 – $HV=385$; 3 –

$HV=220$; 5 – $HV=210$) та після попередньої обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 50\%$ (твердість відповідно 2 – $HV=520$; 4 – $HV=320$; 6 – $HV=510$)

Дослідження складових P_z і P_y сили різання було проведено за допомогою стандартного тензометричного динамометра УДМ–600. При цьому отримані експериментальні значення складових перераховувались до 1 мм ширини різальної кромки інструмента. На рис. 3.10, 3.11 подані результати дослідження складових сил різання.

Таким чином, попередня обробка холодною пластичною деформацією за методом поперечного стиску викликає зниження складових P_z і P_y сил різання у середньому на 25–30%.

Експериментальне дослідження коефіцієнта усадки стружки ξ та повної довжини контакту останньої по передній поверхні інструменту s є прямим і достатньо простим. У всьому іншому умови дослідження були такі самі, як і при визначенні середньої температури різання. Ці характеристики (ξ і s) процесу, які нами було прийнято за показники оброблюваності аустенітних сталей, подано на рис. 3.12, 3.13.

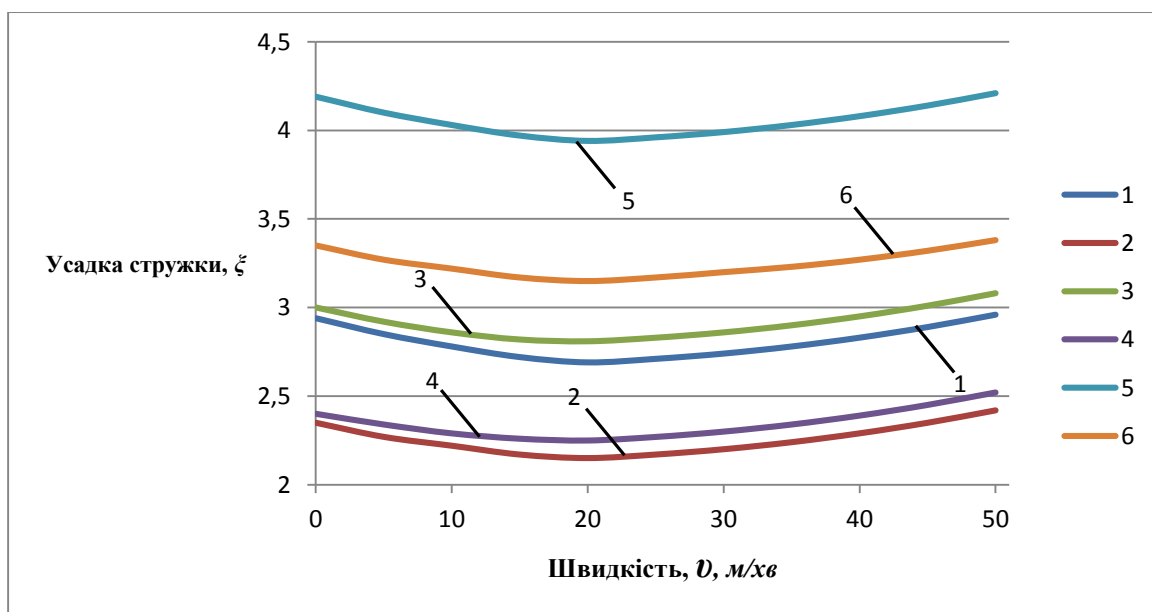


Рисунок 3.12 – Залежності коефіцієнта усадки стружки ξ при вільному ортогональному різанні сталей 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18H10 (AISI 304), 110Г13Л (A128) у незміцненому (твердість відповідно 1 – $HV=385$; 3 – $HV=220$;

5 – $HV=210$) та після попередньої обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 50\%$ (твердість відповідно 2 – $HV=520$; 4 – $HV=320$; 6 – $HV=510$)

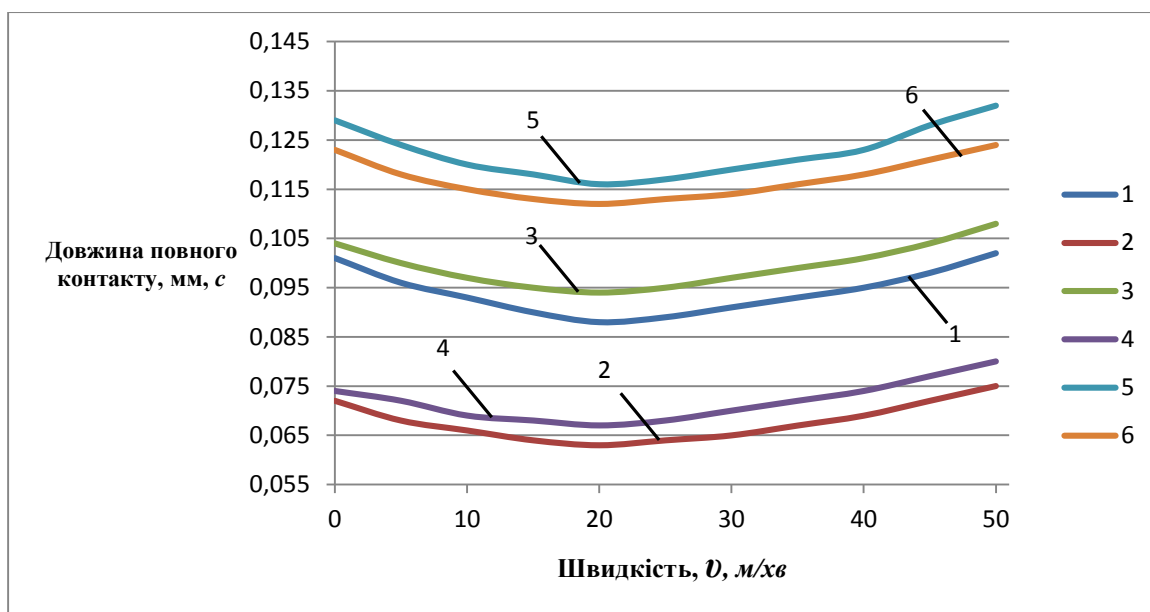


Рисунок 3.13 – Залежності повної довжини контакту s при вільному ортогональному різанні сталей 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18H10 (AISI 304), 110Г13Л (A128) у незміцненому (твердість відповідно 1 – $HV=385$; 3 – $HV=220$; 5 – $HV=210$) та після попередньої обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 50\%$ (твердість відповідно 2 – $HV=520$; 4 – $HV=320$; 6 – $HV=510$)

Попередня обробка об'ємною холодною пластичною деформацією за методом попереднього стиску викликає зниження коефіцієнта усадки стружки на 25–35% і повної довжини контакту на 15–20%. Це є свідченням про суттєве поліпшення оброблюваності аустенітних сталей.

Дані експериментів, що отримані при дослідженні складових P_z і P_y сили різання і повної довжини контакту s послужили для визначення контактних характеристик процесу: нормальних напружень (тиску) q_N , дотичних напружень q_F і середнього коефіцієнту тертя μ за залежностями:

$$q_N = \frac{P_z \cos \gamma - P_y \sin \gamma}{cb}, \quad (3.4)$$

$$\mu = \operatorname{tg}(\gamma + \operatorname{arctg} P_y / P_z), \quad (3.5)$$

$$q_F = \mu q_N. \quad (3.6)$$

Слід зауважити, що у залежностях (14, 15, 16) не враховано значення сил на задній поверхні інструменту, як несуттєвих, оскільки ці сили складають до 5% від сил на передній поверхні.

На рис. 3.14, 3.15, 3.16 подані значення названих контактних характеристик, причому ширину контакту прийнято рівною 1 мм.

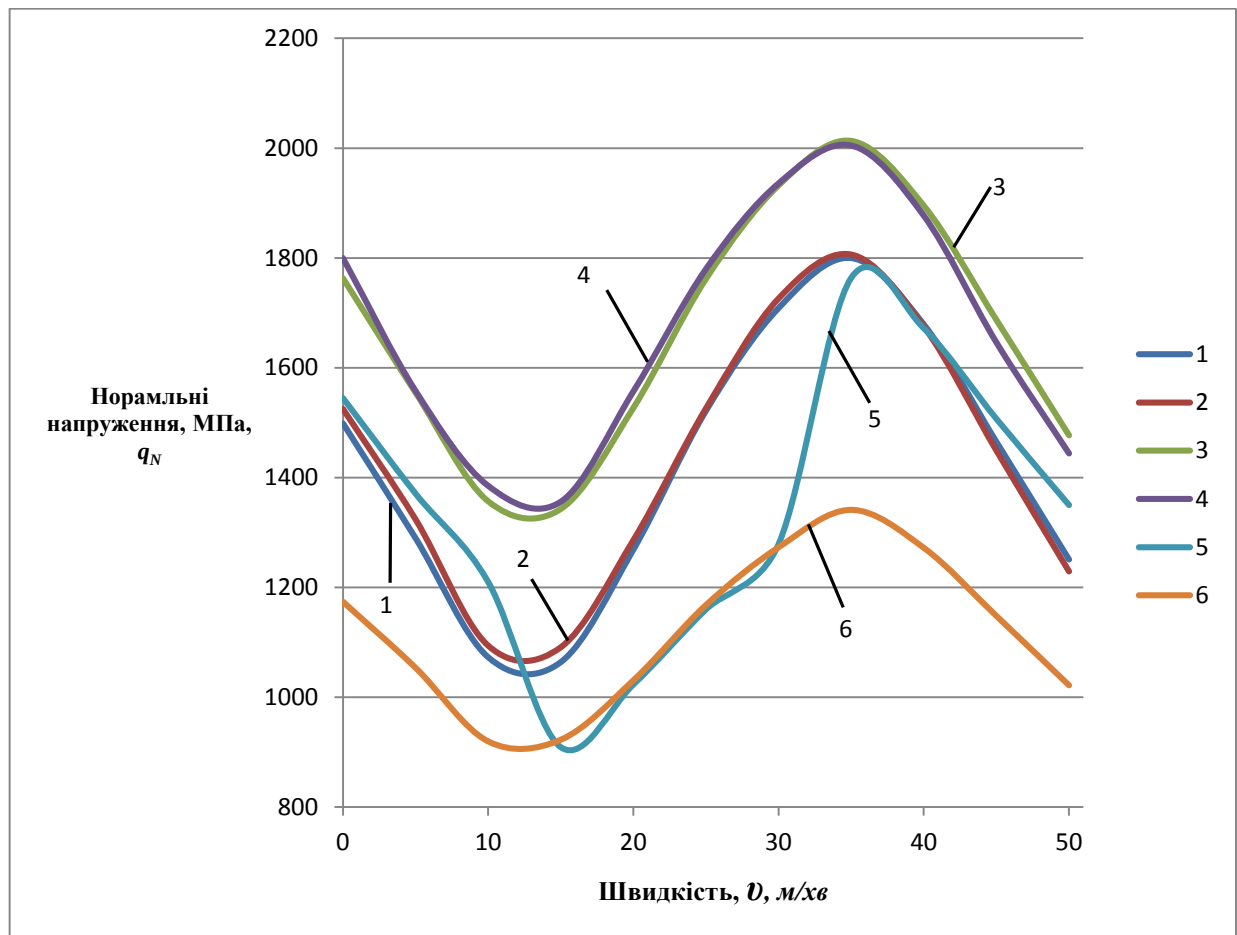


Рисунок 3.14 – Залежності нормальних напружень q_N при вільному ортогональному різанні сталей 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18H10 (AISI 304), 110Г13Л (A128) у незміцненому (твердість відповідно 1 – $HV=385$; 3 – $HV=220$; 5 – $HV=210$) та після попередньої обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 50\%$ (твердість відповідно 2 – $HV=520$; 4 – $HV=320$; 6 – $HV=510$)

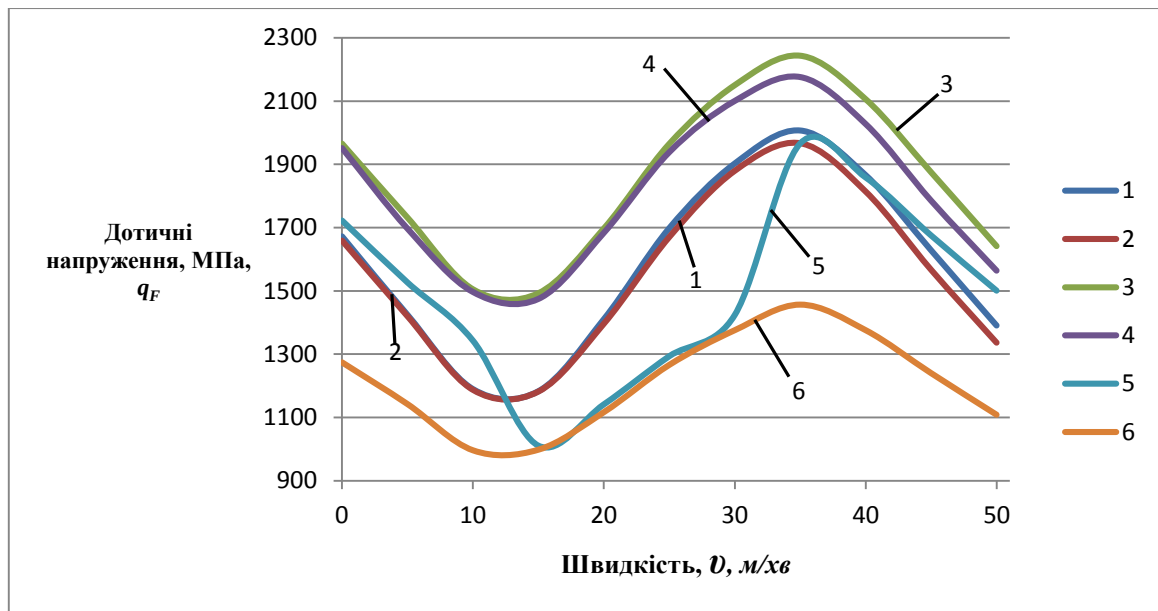


Рисунок 3.15 – Залежності дотичних напружень q_F при вільному ортогональному різанні сталей 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18Н10 (AISI 304), 110Г13Л (A128) у незміцненому (твердість відповідно 1 – $HV=385$; 3 – $HV=220$; 5 – $HV=210$) та після попередньої обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 50\%$ (твердість відповідно 2 – $HV=520$; 4 – $HV=320$; 6 – $HV=510$)

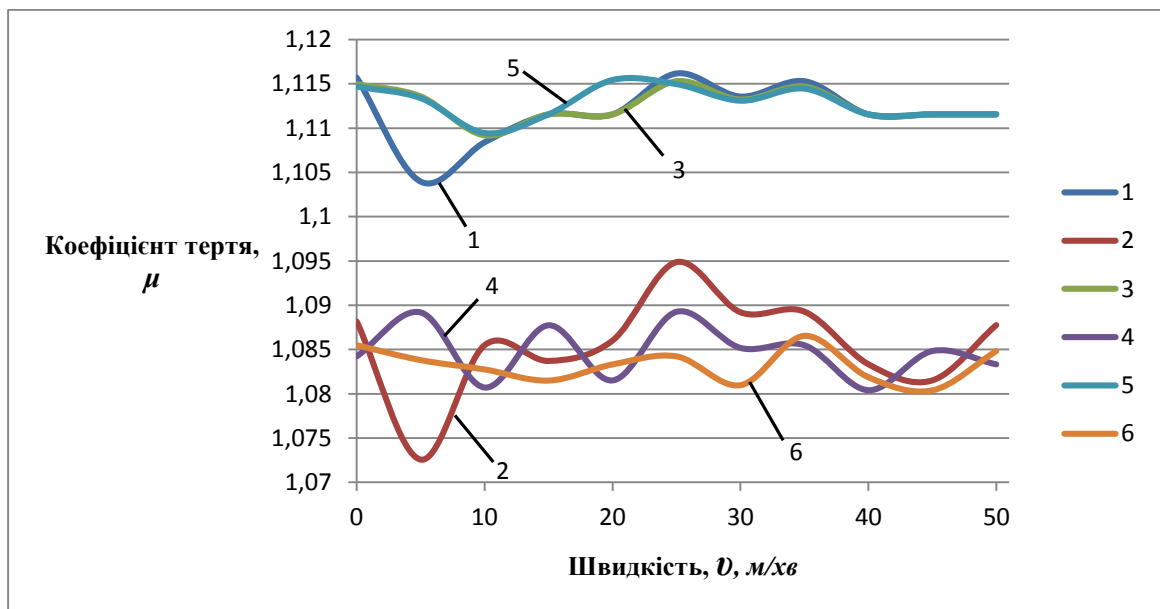


Рисунок 3.16 – Залежності коефіцієнта тертя μ при вільному ортогональному різанні сталей 12X15Г9НД (AISI 201), 08X18Н10 (AISI 304), 110Г13Л (A128) у незміцненому (твердість відповідно 1 – $HV=385$; 3 – $HV=220$; 5 – $HV=210$) та після попередньої обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 50\%$ (твердість відповідно 2 – $HV=520$; 4 – $HV=320$; 6 – $HV=510$)

3.5. Наростоутворення у зоні різання

Наріст на передній поверхні різального інструменту, при обробці пластичних (феритних) сталей, спостерігав ще Я.Г. Усачев [117], а також науковці, що проводили свої дослідження пізніше: В.Д. Кузнецов [140], О.М. Розенберг [106], М.М. Зорев [31], Е.К. Посвятенко [87] та інші. Зокрема, В.Д. Кузнецов стверджує наступне: «Хоча фізична природа наросту і процес його утворення не розкриті, але нам добре відомо, що цілий ряд явищ при різанні чітко і однозначно пов'язані з наростом, його станом і його формою. Наприклад, встановлено зв'язок усадки стружки з геометрією наросту, а через усадку стружки і зв'язок сил різання, зв'язок чистоти обробленої поверхні у різних зонах швидкостей з розмірами та станом наросту, зв'язок стійкості інструменту з фаскою на передній грані різця із захисною роллю наросту і т.д. Наприклад, постійність геометрії наросту при постійних температурах, незалежно від товщин зрізу і швидкості різання; постійність температури, при котрій зникає нарост, і т.д.

Нарост перш за все утворюється на передній грані різця і ріже той же матеріал, з якого він утворився. Нарост не зберігається постійно на грані, а періодично сповзає з неї і частково прилипає до обробленої поверхні, а частково – до стружки, що сходить. Після сходу нарост знову утворюється, знову зникає і т.д. У деяких випадках нарост сходить не повністю, а частинами».

Наші дослідження при обробці аустенітних сталей, які є розвитком ідей попередників про нарост, показали, що протягом всього циклу обробки на низьких та середніх швидкостях різання, тіло наросту має стабільну форму і перебуває у зоні дії виключно пружних деформацій. Таким чином, наріст є додатковим різальним клином. Цей клин генерує система, що адаптується до конкретних умов процесу, тобто мова йде про самоорганізацію цієї системи. При різанні незміцнених аустенітних сталей наріст є досить потужним стабільним тілом на передній поверхні інструменту.

Утворення наросту відбувається на початкових етапах різання з оброблюваного матеріалу, який переходить під дією деформаційного зсуву і стиску в пластичний стан, і практично закінчується після повного включення інструменту в роботу. Довжину цієї ділянки можна визначити за характерним збільшенням товщини стружки на початку її валика. Як приклад, на рис. 3.17 наведено мікрофотографію наросту при вільному ортогональному різанні сталі 08X18H10.



Рисунок 3.17 – Зона стружкоутворення при вільному ортогональному різанні сталі 08X18H10 зі швидкістю $v = 0,15$ м/с, $s_z = 0,15$ мм; різець – сталь Р6М5; $\gamma = 15^\circ$; $\rho = 0,008$ мм; МОР – сульфофрезол

З позицій технології обробки аустенітних сталей, наріст виконує дві функції: позитивну і негативну. Позитивна функція полягає у захисті різальної кромки інструменту і розміщення лунки його зношування на передній грані на деякій відстані від цієї кромки. Як приклад, на рис. 3.18 наведено вигляд передньої поверхні різця при роботі у зоні швидкостей 70–75 м/хв після точіння протягом однієї години.

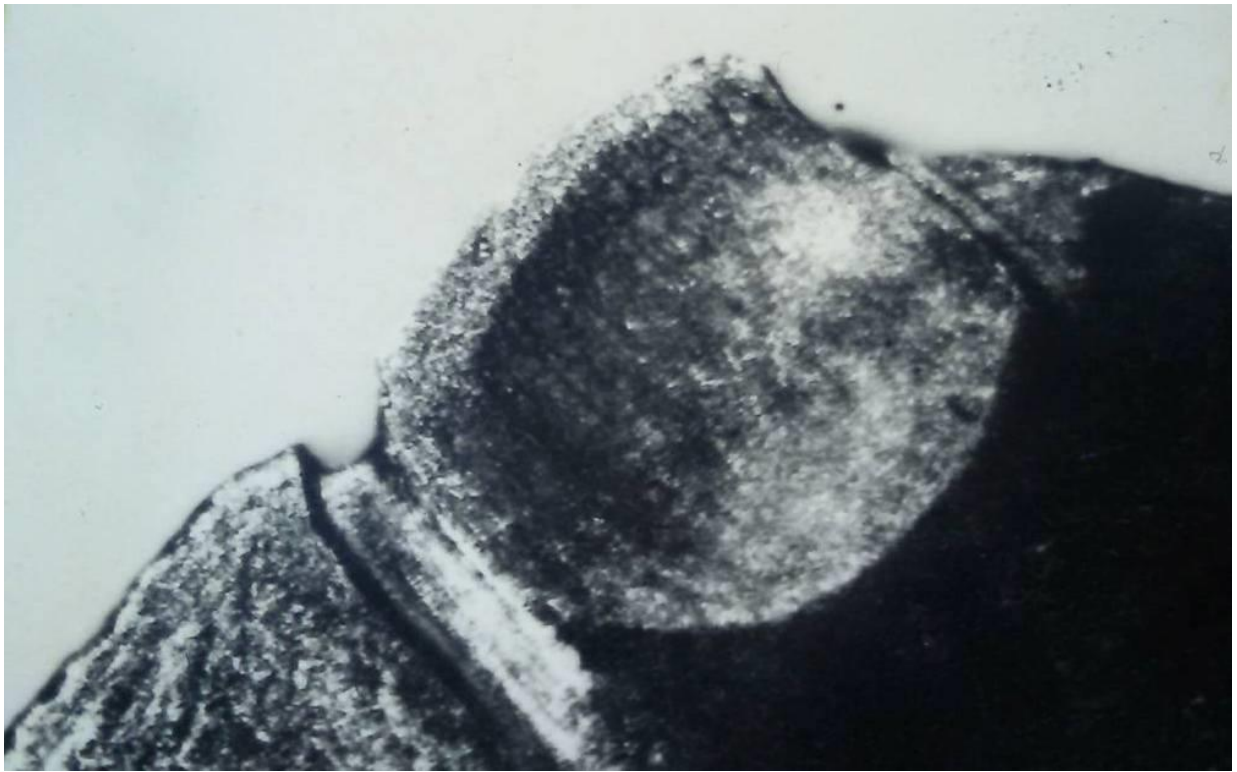


Рисунок 3.18 – Передня поверхня різця із сталі Р6М5 після точіння деталі із сталі 08Х18Н10 з подачею $S=0,09$ мм/об. х 100, МОР – ріпакова олія

Негативна функція наросту полягає у значному погіршенні оброблюваної поверхні деталі через періодичне видалення його твердих часток з боку задньої поверхні. Напружено-деформівний стан оброблюваного матеріалу біля різальної кромки такий, що матеріал, перетворюючись у наріст, набуває деформацій відносного зсуву $e = 20\text{--}50$ незалежно від ступеня зміцнення. Аналітична обробка фотографій мікроструктури «коренів стружки» показує, що вказані значення деформацій на порядок вищі первинних деформацій зсуву у стружці ($e = 1,5\text{--}5$). Незалежно від ступеня зміцнення оброблюваного матеріалу, мікротвердість наросту суттєво перевищує мікротвердість стружки. Так, при різанні сталі 08Х18Н10 цей показник сягає 30 – 35% (відповідно 3,8 – 4,1 ГПа і 2,8 – 3,1 ГПа). Відмінність процесів наростуутворення при різанні незміцненого і зміцненого металу полягає в розмірах і об'ємі тіл наросту (див. рис. 3.19).

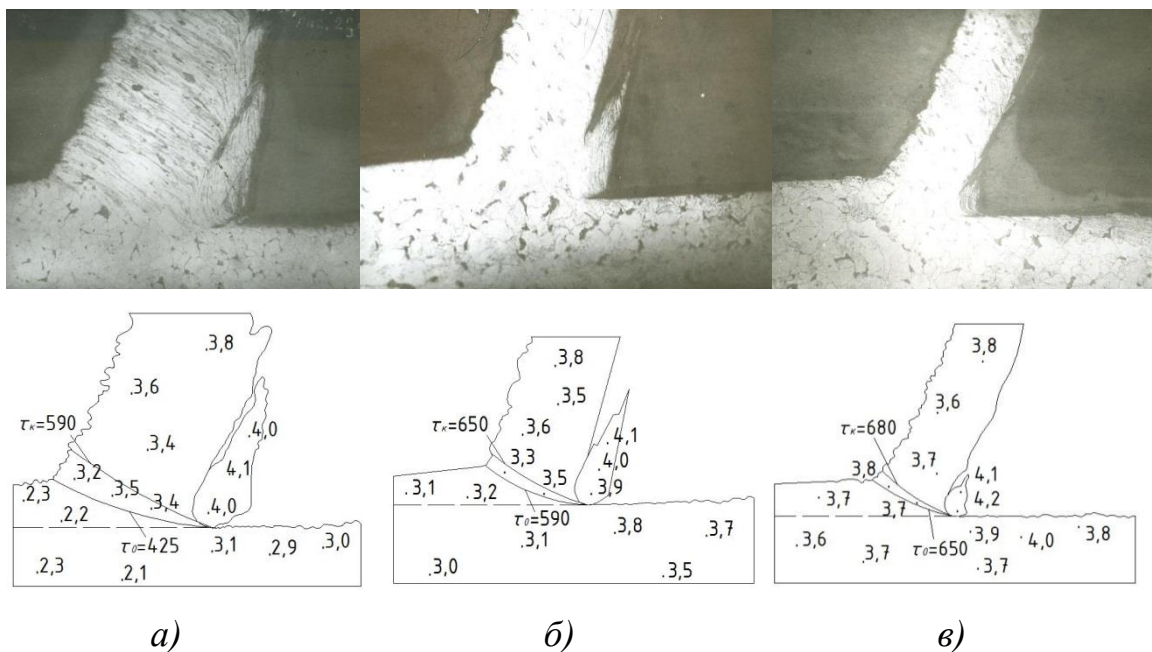


Рисунок 3.19 – Результати дослідження методами мікроструктурного аналізу (x50) і мікротвердості зони стружкоутворення при вільному ортогональному різанні сталі 08X18H10 у незміцненому (а – $HV=2,1$ ГПа) та після ХПД (б – $\psi = 0,30$; $HV=3,0$ ГПа; в – $\psi = 0,60$; $HV=3,8$ ГПа) стані: $v = 0,15$ м/с, $s_z = 0,15$ мм; різець – сталь Р6М5; $\gamma = 15^\circ$; $\rho = 0,008$ мм; МОР – ріпакова олія; розмірності характеристик НДС: H_μ – ГПа; τ_0 , τ_κ – МПа

Отже, формування тіла наросту і його дію на основні показники процесу різання аустенітних сталей можна подати наступним чином. На початковій ділянці процесу наріст починає утворюватися з оброблюваного матеріалу під дією пластичних деформацій відносного зсуву. Таке формування закінчується при повному включенні інструменту у роботу. Мікрорентгеноспектральний аналіз та металографічні дослідження за допомогою оптичних та растрових електронних мікроскопів показали, що аустенітна сталь, перетворюючись у наріст при дії екстремально великих пластичних деформацій, зберігає свій хімічний склад. Отже, впливу середовища та різального інструменту немає. При цьому відзначаються часткові перетворення за схемою «аустеніт – мартенсит». Таким чином, різальні властивості наросту мають деформаційну природу.

Протягом усього циклу обробки тіло наросту має стабільні форму і об'єм, оскільки знаходиться в умовах всебічного стискання з боку передньої поверхні інструменту, оброблюваного матеріалу і стружки. Наріст при цьому зазнає лише пружних деформацій.

З позицій теорії механічної обробки тіло наросту є додатковим різальним клином з переднім γ_n та заднім α_n кутами, а також радіусом ρ_n округлення різальної кромки. Наріст без зовнішнього втручання генерується системою «інструмент – деталь», адаптуючись до конкретних умов процесу різання за законами самоорганізації. Клин наросту має функцію зниження опору різання.

На рис. 3.20 подано типовий профіль «корня» стружки з наростом.

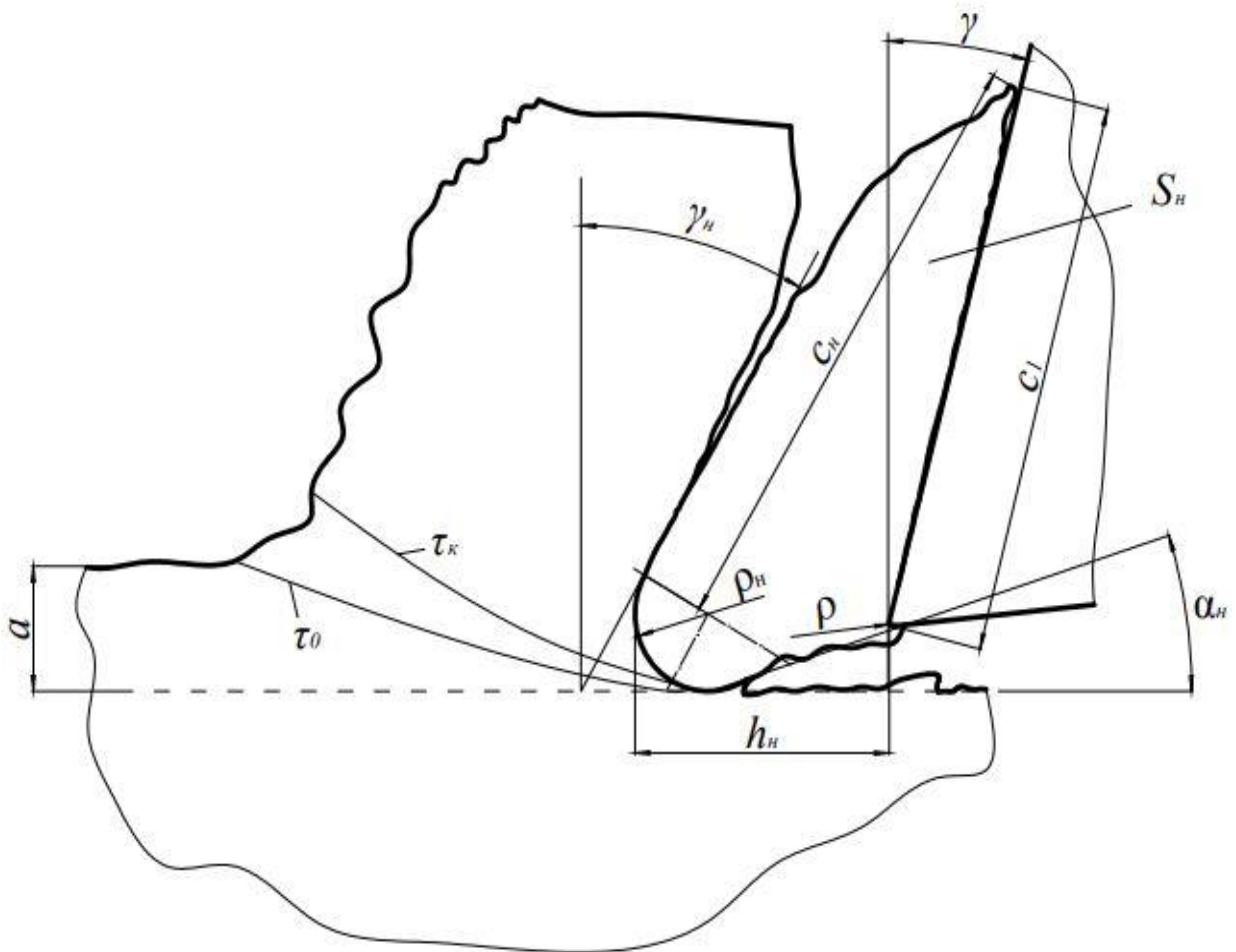


Рисунок 3.20 – Типовий профіль «корня» стружки з наростом

Для повної кількісної характеристики тіла наросту слід використати такі основні залежності, які отримано експериментально.

Радіус округлення ρ_n :

$$\rho_n = 0,2 c_n ; \quad (3.7)$$

$$\rho_n = 0,1 a \xi^{1,5} ; \quad (3.8)$$

$$c_n = 1,1 c_1 , \quad (3.9)$$

де c_n – довжина контакту наросту зі стружкою, мм; a – товщина зрізу, мм; c_1 – довжина пластичної ділянки контакту стружки з передньою поверхнею інструменту; ξ – коефіцієнт усадки стружки.

Передній кут γ_n тіла наросту:

$$\gamma_n = B \gamma , \quad (3.10)$$

де γ – передній кут інструменту, град; B – коефіцієнт, що залежить від ступеня зміцнення конкретної сталі.

Висота h_n наросту:

$$h_n = 5 \rho_n (\cos \gamma - 1,1 \cos \gamma_n). \quad (3.11)$$

Площа S_n поздовжнього перерізу, мм²:

$$S_n = 1,5 \rho_n^2 [10 \operatorname{tg}(\gamma_n - \gamma) + 1]. \quad (3.12)$$

Найбільш важливі із цих характеристик – радіус округлення та передній кут. Радіус округлення визначається довжиною пластичного контакту стружки з передньою поверхнею інструменту. На передній кут наросту впливає ступінь деформаційного зміцнення і передній кут інструменту. Різниця процесів наростотворення при різанні незміцненого та зміцненого матеріалів полягає у розмірах і об'ємі тіл наросту.

У випадку обробки матеріалу, який зміцнено ХПД і в результаті має більш високий опір деформації, ніж незміцнений матеріал, відбувається більш ранній перехід у пластичний стан. Таким чином за допомогою деформаційного зміцнення об'єм тіла наросту можна зменшити у 5 – 25 разів, а різницю між передніми кутами інструменту і наросту до 5 – 20°. Твердість тіла наросту перевищує твердість стружки на 30 – 35%, а твердість оброблюваного матеріалу у 2 – 5 разів і не залежить від ступеня попередньої ХПД.

У табл. 3.4 подано додатковий вплив МОР на основні характеристики тіла наросту. Експериментальні дані показали, що середовище на основі екологічно чистої рослинної ріпакової олії дозволяє зменшити величини ρ_n та γ_n наросту відповідно на 8 – 35% і 5 – 10%.

Таблиця 3.4 – Дія ХПД і МОР на характеристики наросту; $v = 10$ м/хв;
 $a = 0,05$ мм; $\gamma = 15^\circ$; $\rho = 5$ мкм

Аустенітна сталь	Деформація, %	HV, ГПа; сульфопрезол	γ_n , град	S_n , мкм	HV, ГПа; ріпакова олія	γ_n , град	S_n , мкм	Зменшення, %	
								γ_n	ρ_n
08X18H10 (AISI 304)	0	2,10	32	180	2,00	29	165	4,9	8,0
	50	3,20	22	45	3,05	20	25	9,0	33,3
12X15Г9НД (AISI 201)	0	3,85	30	165	3,65	27	145	10,0	12,1
	50	5,20	19	40	4,95	18	25	5,3	37,5
110Г13Л (A128)	0	2,15	26	140	2,05	23	125	10,1	10,7
	50	5,10	18	30	4,90	17	20	5,5	33,3

На ділянці стабільного різання тіло наросту перебуває в пружному стані, оскільки напруження, що діють на його передній та задній поверхнях, завдяки надзвичайно високому градієнту зміцнення матеріалу наросту недостатні для переведення останнього у пластичний стан. Навпаки, у контактному шарі стружки і поверхневому шарі деталі, які межують з наростом, відбуваються глибокі пластичні деформації, про що свідчить текстура, що виникає в них, і зростання мікротвердості. Так, в зоні вторинної деформації стружки значення мікротвердості наближається до значень мікротвердості наросту.

В результаті досліджень було встановлено можливість різання матеріалу завдяки наросту, що утворюється з цього ж матеріалу. Сталь 08X18H10, що

використовувалась в даному дослідженні, мала структуру із зернами аустеніту 4 – 5 балів (40 – 80 мкм), оточеними карбідною сіткою з невеликою кількістю зерен перліту розміром 15–30 мкм. Це дало можливість вивчення мікроструктур на оптичному і растровому електронному мікроскопах.

Вивчення мікрофотографій «коренів стружки» показало, що оброблюваний матеріал, перетворюючись у наріст під дією великих пластичних деформацій, зберігає свою структуру. Тіло наросту складається із сильно витягнутих зерен аустеніту, оточених карбідною сіткою, що повністю збереглася, і дещо менш деформованих зерен перліту. На досліджених зразках не виявлено ніяких ознак структурних або хімічних перетворень, а також наслідків інтенсивної теплової дії, проте, як встановлено нами раніше, у тілі наросту частково відбуваються перетворення $\gamma \rightarrow \alpha$. Це пояснюється великими значеннями ХПД при переході оброблюваного матеріалу у наріст.

Таким чином, наріст має ту саму структуру, що і оброблюваний матеріал у початковому стані. Так, мікротвердість наросту у 3 – 5 раз перевищує мікротвердість оброблюваного матеріалу. Однак, нетипові для звичайних конструкційних і маловуглецевих сталей фізико–механічні і різальні властивості наросту мають виключно деформаційну природу.

Основними геометричними характеристиками наросту є радіус округлення створеного у процесі стабільного різання нового клину ρ_n , нового переднього кута γ_n та довжини підшви наросту s_n , тобто пластичної частини контакту стружки з передньою поверхнею інструменту. Динаміка зміни цих характеристик попередньою холодною деформацією та застосуванням різних МОР подана на рис. 3.21, 3.22, 3.23.

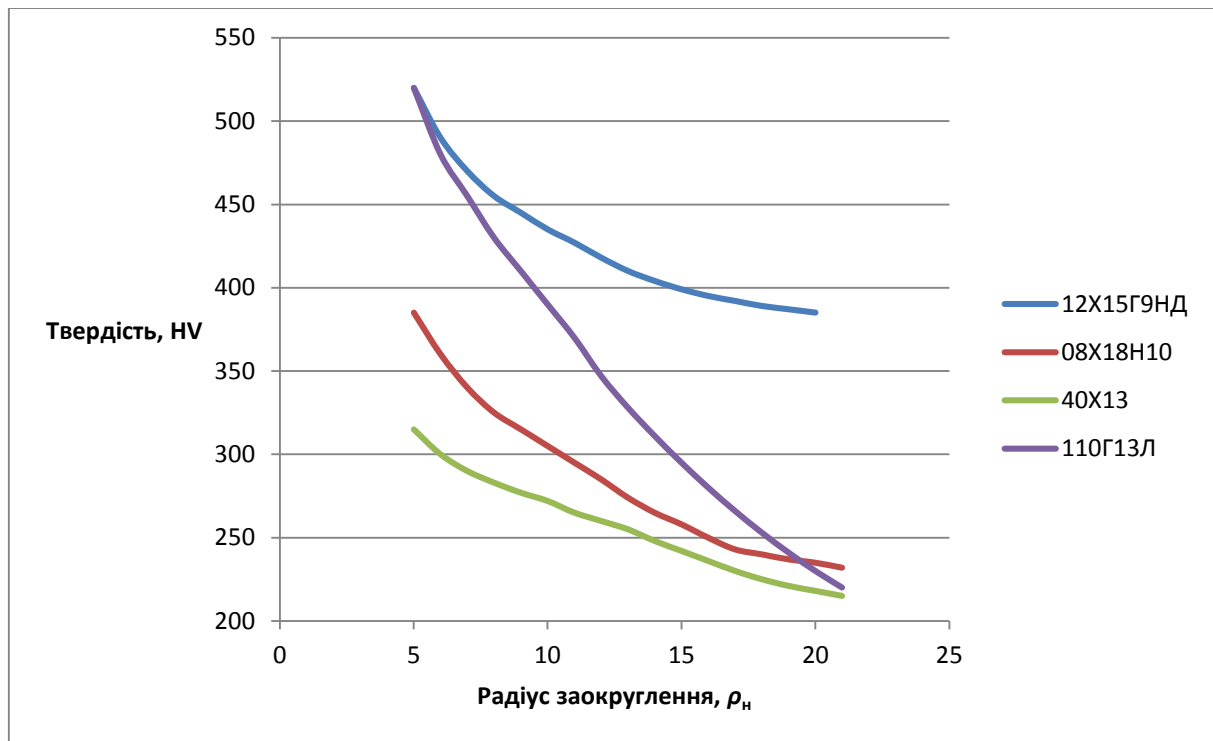


Рисунок 3.21 – Залежність радіуса заокруглення наросту від твердості матеріалу різних аустенітних сталей

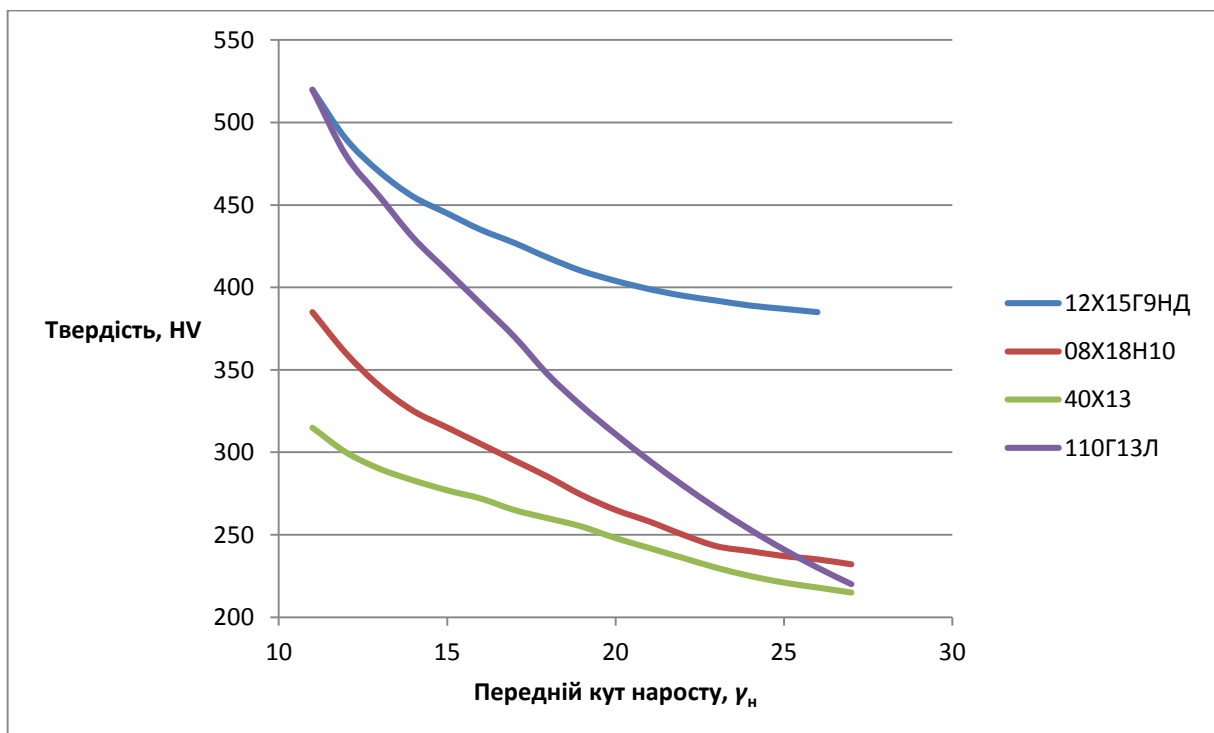


Рисунок 3.22 – Залежність величини переднього кута наросту від твердості матеріалу різних аустенітних сталей

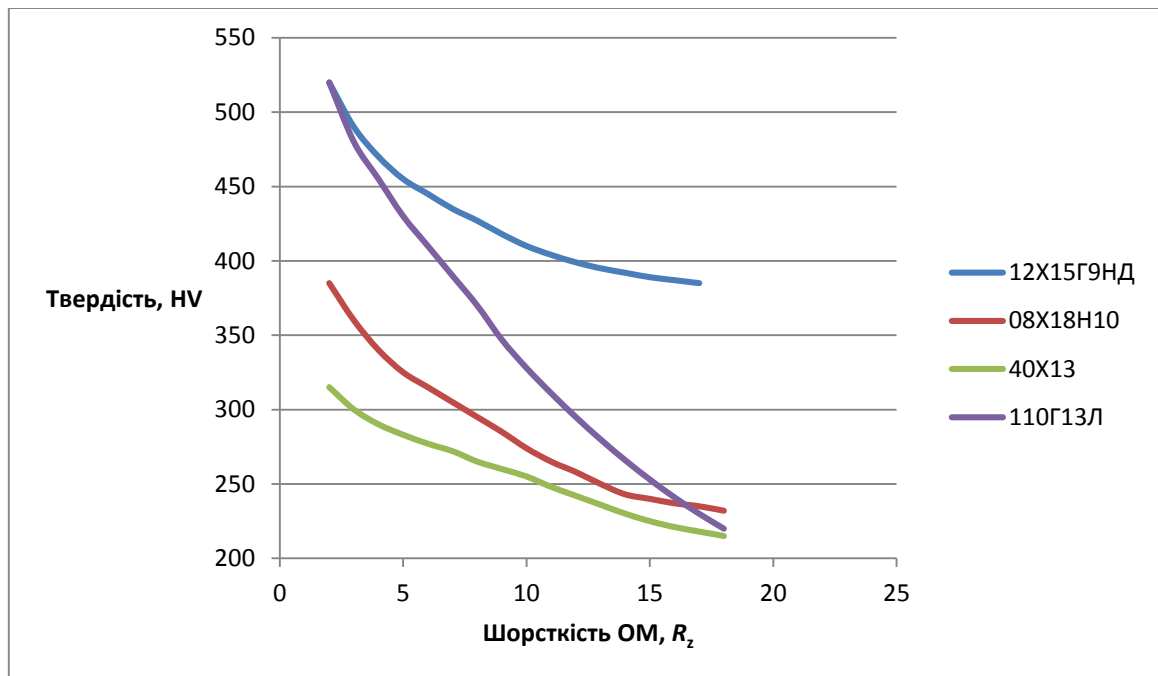


Рисунок 3.23 – Залежність шорсткості обробленого матеріалу від твердості матеріалу різних аустенітних сталей

Таким чином, попередня ХПД аустенітних сталей усіх класів та марок разом з наступною дією екологічно чистих МОР рослинного походження дозволяє у кілька разів знизити характеристики наросту. Тим самим НДС систем «ОМ – ІМ – стружка» максимально наближається до заданої. Зона пластичного контакту стружки з передньою поверхнею зменшується, параметри різального клину набувають значень, близьких до початкових (створюваних заточуванням), а шорсткість обробленої поверхні поліпшується за параметром R_z у 5–20 разів.

3.6. Взаємозв'язок явищ при різанні аустенітних сталей, попередньо зміцнених холодною деформацією, в умовах екологічно чистих МОР

В процесі підвищення оброблюваності деталей засобів транспорту із аустенітних сталей, змінювалися три основні параметри процесу різання: твердість, швидкість та мастильно–охолоджуюча рідина (рис 3.24).

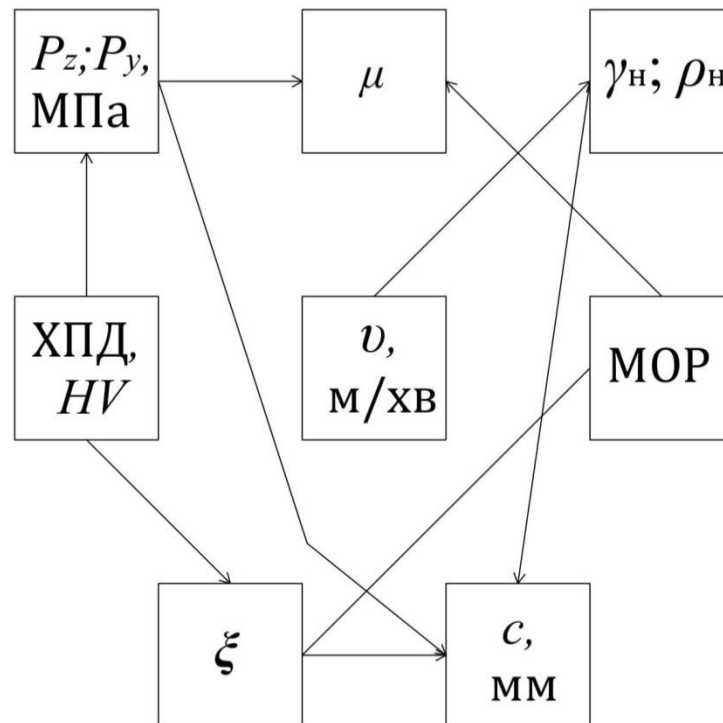


Рисунок 3.24 – Взаємозв’язок явищ при різанні аустенітних сталей.

Вплив ХПД на зміну твердості аустенітних сталей, полягає у наступному. При підвищенні ступеня попереднього зміцнення опір зсуву на початковій границі пластичної зони (зони стружкоутворення) буде зростати. На рис. 3.19 ця величина для аустенітної сталі марки 08X18H10 зміниться з $\tau_0 = 425$ МПа до $\tau_0 = 650$ МПа. Проте на кінцевій границі пластичної зони значення опору зсуву при обробці незміцненої і попередньо зміцненої ХПД сталей будуть відрізнятися між собою не так значно. У нашому випадку відповідно $\tau_k = 590$ МПа і $\tau_k = 680$ МПа. Пояснюється це наступним чином. При значеннях відносного зсуву, що перевищують 0,5 – 1,0, коефіцієнт зміцнення $d\tau/d\varepsilon$ сталей різко знижується ($d\varepsilon$ – зростання деформації, $d\tau$ – зростання опору деформації). Тому характеристики оброблюваної сталі, а також інші фактори процесу різання, відносно слабо впливатимуть на механічні властивості стружки, зокрема на опір зсуву на кінцевій границі пластичної зони. Це добре ілюструється експериментальними даними, що приведено на рис. 3.19.

У процесі різання незміцненої сталі початкова зона пластичної зони характеризується наступною умовою пластичності:

$$\tau = \tau_{S_0}, \quad (3.13)$$

де τ – дотичні напруження; τ_{S_0} – опір зсуву незміцненої сталі.

При підвищенні ступеня попереднього зміцнення оброблюваної сталі зростає його опір зсуву і зростають дотичні напруження, що діють на початковій границі пластичної зони. Частки попередньо зміцненого металу проходять початкову зону незміцненого металу не деформуючись, оскільки діюче напруження τ_{S_0} недостатнє для переходу сталі у пластичний стан:

$$\tau < \tau'_{S_0}, \quad (3.14)$$

де τ'_{S_0} – дотичне напруження на початковій границі пластичної зони зміцненого матеріалу.

Таким чином, попередньо зміцнений метал починає деформуватись лише, коли виконується умова:

$$\tau = \tau'_{S_0}, \quad (3.15)$$

Отже, початкова границя пластичної зони при підвищенні попереднього зміцнення металу ХПД буде повертатись у бік передньої поверхні інструменту.

Опір зсуву металу стружки буде дещо вищим у випадку обробки зміцненого ХПД цього металу. Тому попереднє зміцнення оброблюваної аустенітної сталі викличе також деякий (невеликий) поворот у бік передньої поверхні інструменту кінцевої границі пластичної зони. Проте цей поворот буде суттєво меншим повороту початкової границі. На кінцевих границях пластичної зони закінчиться перехід металу з пластичного стану у стружку і тут будуть задовольнятися наступні умови пластичності:

$$\tau = \tau_{S_1}; \quad (3.16)$$

$$\tau = \tau'_{S_1}, \quad (3.17)$$

де τ_{S_1} і τ'_{S_1} – опір зсуву відповідно незміцненого та зміцненого металу на кінцевих границях пластичної зони (зони стружкоутворення).

Отже, підвищення ступеня попереднього ХПД призведе до значного звуження пластичної зони (рис. 3.19) і збільшення кута зсуву φ_y , що визначає її положення (φ_y – кут між площиною різання і умовною площиною зсуву, що проходить через різальну кромку і лінію перетину зовнішніх поверхонь зрізаного шару і стружку. У нашому випадку (рис. 3.19) це збільшення кута зсуву φ_y з 33° до 39° , тобто поворот на 6° . Оскільки, кут зсуву пов'язаний з коефіцієнтом усадки стружки ξ залежністю:

$$\xi = \frac{\cos(\varphi_y - \gamma)}{\cos \varphi_y}, \quad (3.18)$$

збільшення φ_y викличе зниження коефіцієнта усадки стружки, а значить і зниження сили різання (P_z і P_y). У цьому і полягає безпосередній вплив попереднього ХПД на процес стружкоутворення.

Зниження деформацій у зоні стружкоутворення викличе також і зменшення тепловиділення, оскільки відомо, що температура різання у цілому сильно залежить від джерела тепла у цій зоні, яким є деформація.

Крім того, зміна механічних властивостей за допомогою ХПД буде діяти на процес стружкоутворення через інші фактори. У цьому полягатиме вторинна дія пластичної деформації. Зокрема, такий вплив буде спостерігатись через зменшення інтенсивності процесу наростоутворення, тобто наближення переднього кута інструменту та радіуса його округлення до величин, створюваних заточкою.

Зміна механічних властивостей аустенітної сталі буде також діяти через кут дії ω , тобто кут, що визначає напрямок сили стружкоутворення, а значить і її складових P_z та P_y . Зниження величини коефіцієнта усадки стружки приведе до зменшення довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструмента, оскільки коефіцієнт усадки стружки і довжина контакту взаємно впливають. Оскільки середній коефіцієнт тертя μ на передній поверхні пов'язаний з кутом дії ω залежністю Зворикіна

$$\omega = \arctg \mu - \gamma, \quad (3.19)$$

то зміна кута дії викличе додаткову зміну (збільшення) кута зсуву ϕ_y . Це також призведе до полегшення процесу стружкоутворення.

Позитивна дія МОР на рослинній основі полягатиме у додатковому зменшенні коефіцієнта тертя μ на передній поверхні інструменту, оскільки шлях тертя стружки на цій поверхні зменшуватиметься. Це послужить додатковим зменшенням температури різання, викликаной цим джерелом тепла.

Використання екологічно чистих МОР рослинного походження, а саме, ріпакової олії, дає зниження коефіцієнта тертя μ та коефіцієнта усадки стружки ξ на 30% та 80% відповідно.

Зміна швидкості різання в межах 5–50 м/хв в поєднанні з попереднім ХПД та МОР дозволяє керувати явищем появи наросту.

Сумісна дія вищезгаданих факторів дозволяє суттєво підвищити оброблюваність аустенітних сталей, для яких складність обробки різанням лезовим інструментом зі швидкорізальної сталі є звичним явищем.

Таким чином, враховані всі основні проміжні фактори процесу різання, що знаходились у «чорному ящику» (рис. 2.1).

Висновки до розділу 3

Математичну модель, яку було запропоновано у розділі 2, перевірено на адекватність. Встановлено, що на оброблюваність аустенітних сталей у діапазоні швидкостей різання 5–50 м/хв і товщинах зрізу 0,01–0,05 мм суттєво впливають три фактори процесу: холодне деформаційне зміцнення з деформаціями до $\varepsilon = 67\%$, вид мастильно–охолоджувальної рідини та, власне, швидкість різання. Модель також враховує взаємовплив цих факторів. Похибка моделі не перевищувала 5%.

Визначено вид екологічно чистої мастильно–охолоджувальної рідини рослинного походження. Дослідження трьох марок таких рідин у порівнянні з традиційними сульфозфрезолом Р, рідиною МР–7 та мінеральним маслом И–20

показало переваги рідин рослинного походження. З врахуванням екологічних чинників оптимальною було вибрано МОР на основі ріпакової олії.

Встановлено, що вплив трьох названих вище факторів на явища при різанні аустенітних сталей полягає у зниженні середньої температури різання на 30–50°C, складових P_z та P_y сили різання на 25–30%, коефіцієнта усадки стружки на 25–35%, повної довжини контакту на 15–20%. Контактні явища на передній поверхні змінюються так: тиск та дотичні напруження знижуються на 20–30%, а середній коефіцієнт тертя без врахування наростоутворення знижується не суттєво та знаходиться в межах $\mu = 1,07–1,115$.

Розвинуто вчення про наростоутворення, яке при різанні аустенітних сталей у зоні швидкостей та температур різання, при котрих спостерігається це явище, полягає у наступному. Нарост є додатковим різальним клином і утворюється на передній поверхні інструменту із оброблюваного матеріалу. Нарост є результатом самоорганізації системи «оброблюваний матеріал – інструмент», а його розміри і радіус округлення залежать від ступеня ХПД та виду МОР. Твердість наросту перевищує твердість оброблюваного матеріалу у 3 – 4 рази. У тілі наросту відбуваються часткові перетворення $\gamma - \alpha$. При незмінних характеристиках процесу різання аустенітних сталей тіло наросту практично залишається постійним. При зростанні ХПД це тіло зменшується і за законами самоорганізації (синергетики) системи наближається до параметрів інструменту, створених заточкою.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Формування валика стружки при обробці аустенітних сталей

Попереднє ХПД у поєднанні з використанням сучасних МОР на рослинній основі є потужним засобом поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей. Це, наприклад, видно із рис. 4.1, де представленні фрагменти процесу стружкоутворення при вільному ортогональному різанні сталі 12Х15Г9НД, зміцненою поперечним стиском у середовищі ріпакової олії (а) та сульфозфрезолу Р (б). Поліпшення оброблюваності цієї сталі характеризується, крім зменшення довжини контакту стружки по передній поверхні інструменту і коефіцієнту усадки стружки, меншим радіусом завитка останньої на 28%.



а)



б)

Рисунок 4.1 – Фрагменти стружкоутворення при вільному ортогональному різанні сталі 12Х15Г9НД (AISI 201), зміцненої по схемі поперечного стиску з деформацією 46%, у середовищі ріпакової олії (а) та сульфозфрезолу Р (б)

Встановлено, що при підвищенні твердості аустенітної сталі, діаметр валика стружки зменшується (рис. 4.1). При цьому діаметр валика стружки практично не залежить від швидкості різання в діапазоні швидкостей $v = 1,25\text{--}20$ м/хв. Це явище позитивно впливає на величину коефіцієнта заповнення канавок K різального інструменту.

На рис. 4.2 показано процес формування стружки у канавці протяжки при різанні незміцненої (HV 1950–1980 МПа; позиції a – e) та попередньо зміцненої ХПД (HV 2800–2900 МПа; позиції $є$ – $ї$) сталі 08Х18Н10. У даному випадку попереднє ХПД дозволяє підвищити допустиму довжину протягування на 70%.

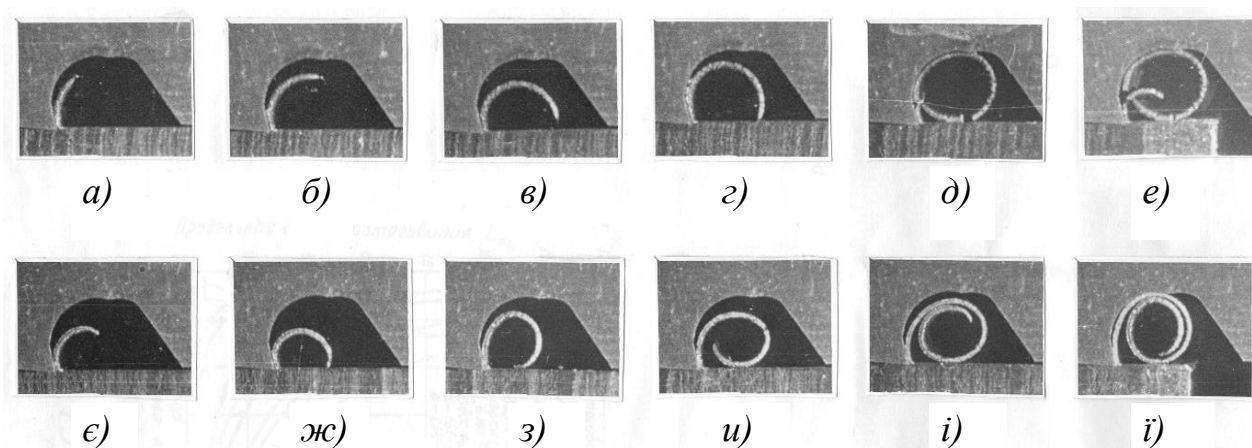


Рисунок 4.2 – Стадії формування валика стружки при протягуванні незміцненої (a – e) та зміцненої ($є$ – $ї$) сталі 08Х18Н10. Глибина стружкової канавки 3,6 мм

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти заповнення канавки для стружки

Оброблювальна сталь		Канавка для стружки	Коефіцієнт заповнення K при товщині зрізу a_z , мм		
Марка	Твердість HV , МПа	Глибина h , мм	0,01	0,03	0,05
12Х15Г9НД	3850–3900	3,6	0,34	0,31	0,28
	5050–5200		0,57	0,55	0,52
08Х18Н10	2200–2300		0,37	0,33	0,30
	3180–3250		0,63	0,59	0,55
110Г13Л	2150–2220		0,27	0,24	0,21
	5100–5180		0,48	0,43	0,39

У таблиці 4.1 та на рис. 4.2 подано вплив попереднього ХПД на коефіцієнт заповнення стружкової канавки різальної протяжки та на гранично допустиму довжину протягування.

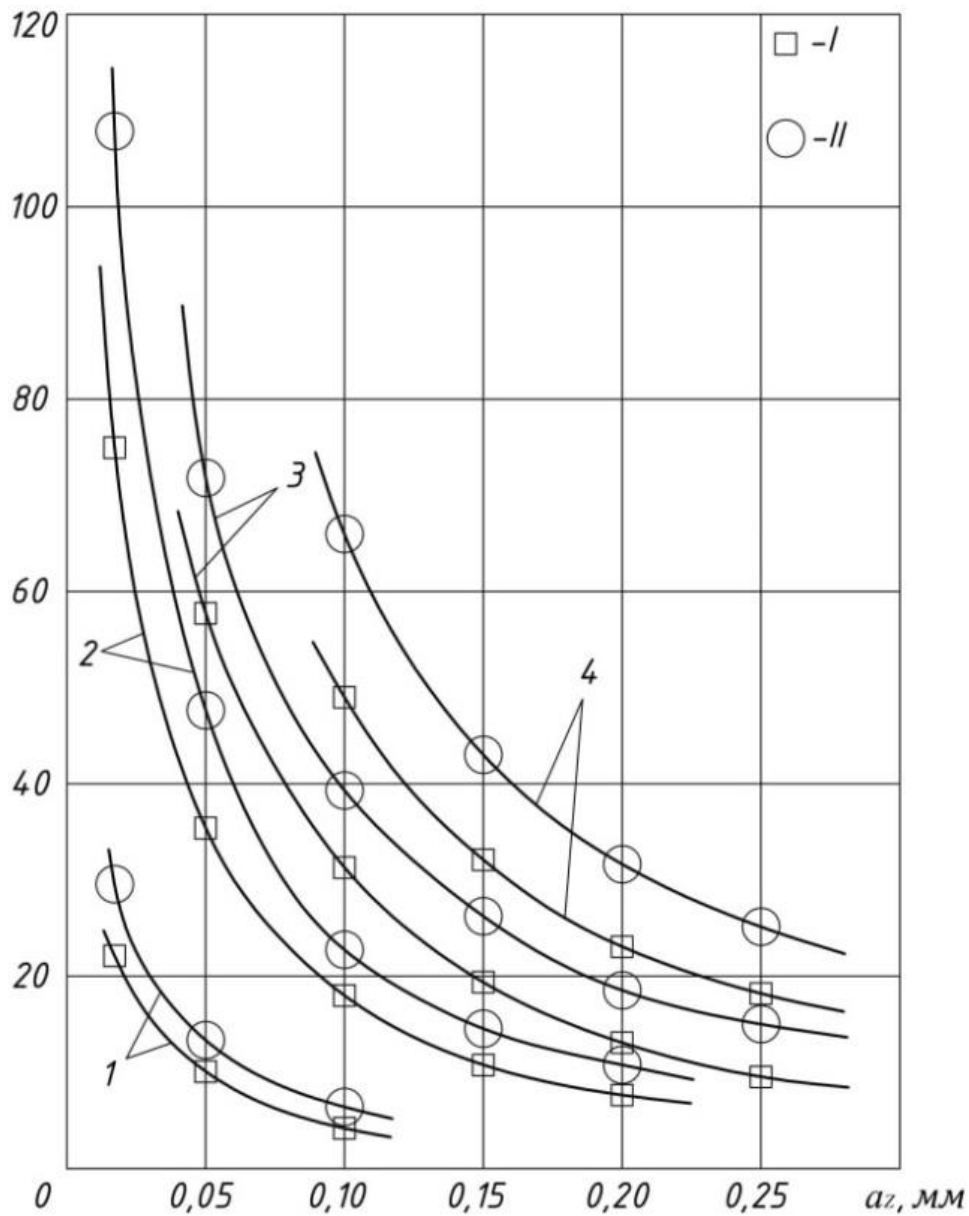


Рисунок 4.3 – Залежності граничної довжини протягування L від товщини зрізу a_z при протягуванні сталі 08X18H10 протяжкою (сталь P18; $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 3^\circ$; МОР – ріпакова олія) при $v = 1,25$ м/хв: I – $HV = 1950\text{--}1980$ МПа; II – $HV = 2780\text{--}2850$ МПа; 1 – $h = 1,2$ мм; 2 – $h = 2,6$ мм; 3 – $h = 3,6$ мм; 4 – $h = 4,8$ мм

4.2. Формування залишкових напружень при холодному пластичному деформуванні аустенітних сталей

При нанесенні покриттів на зношені деталі засобів транспорту методами інженерії поверхні, які дозволяють отримувати поверхневі шари товщиною понад 0,5 – 1 мм, актуальним стає питання залишкових напружень у поверхневих шарах. Таку товщину поверхневого шару при відновленні дають традиційні методи наплавки і напилення.

Отже, важливою для корисних стискаючих напружень є сумарна дія механічних та теплових факторів при формуванні покриттів власне наплавленням чи напиленням, потім обробкою ХПД і, нарешті, різанням.

На експлуатаційні властивості деталей машин разом з геометричними параметрами сильно впливає фізико–механічний стан поверхневого шару, зокрема залишкові напруження (технологічні залишкові напруження). Технологічні залишкові напруження можуть впливати на точність обробки, статичну і динамічну міцність, а також корозійну стійкість деталей. Початкова точність машин при експлуатації також у значному ступені залежить від технологічних залишкових напружень. Відомі випадки, коли виготовлені з високою точністю колінчасті вали двигунів, зубчасті колеса, диски турбін та інші подібні деталі втрачали свою початкову точність через перерозподіл залишкових напружень під час роботи. Це приводило до посиленого зношування поверхонь тертя, розбалансування роторів та інших дефектів. Розтягуючі напруження біля поверхні разом з робочими напруженнями у перші ж години роботи можуть викликати появу тріщин. Ці явища іноді прискорюються від дії середовища, у якому працює деталь.

Залишкові напруження 1–го роду виникають у результаті дії різних факторів при виготовленні деталі.

Величина цих напружень визначається густиною дислокацій, а знак залежить від характеру розміщення однорідних дислокацій по відношенню до поверхні деталі. Стискаючі напруження виникають у випадку переважаючого

розміщення біля поверхні великої кількості позитивних дислокацій на паралельних площинах ковзання. Переважаюче розміщення біля поверхні негативних дислокацій сприяє виникненню напружень розтягу.

Наявність надлишку дислокацій одного знаку визначається не тільки схемою деформування, але і температурою, при якій відбувається деформація, а також хімічним складом оброблюваного матеріалу.

Фізичною моделлю механізму утворення технологічних напружень стосовно деталей, поверхневий шар яких деформувався при механічній обробці, є дислокаційна модель.

Технологічні фактори (методи та режими обробки, стан інструменту, вид мастильно–охолоджувального середовища тощо) сильно впливають на величину і знак залишкових напружень 1–го роду. Точіння, як правило, призводить до виникнення розтягуючих напружень величиною до 700 МПа при глибині розповсюдження в межах 0,05 – 0,2 мм у залежності від умов обробки. При фрезеруванні виникають як розтягуючі, так і стискаючі напруження; останні більш характерні для попутного фрезерування деталей із жароміцних сплавів. Фрезерування деталей з титанових сплавів супроводжується утворенням стискуючих напружень. При шліфуванні виникають розтягуючі напруження. Деформуюче протягування твердосплавним інструментом, особливо деталей з кінцевою товщиною стінки, призводить до утворення стискуючих напружень до 500 МПа у поверхневому шарі товщиною до 1 мм. Різальне протягування наводить незначні розтягуючі напруження, а його комбінація з наскрізним деформуючим протягуванням призводить до складання епюр напружень, причому на користь останнього процесу.

Склад мастильно–охолоджувальних рідин (МОР) та способи їх підведення у зону різання також впливають на величину і знак макронапружень, що виникають у поверхневих шарах деталей після обробки різанням.

Застосування екологічно чистих МОР рослинного походження, а саме, ріпакової олії, вносить зміни у фізико–хімічні процеси у зоні контакту різального інструменту з поверхнею, що обробляється. Ці процеси визначають напружений

стан поверхневих шарів. Відомо, що одні й ті ж середовища у залежності від методу та умов обробки неоднаково впливають на величину і знак залишкових напружень. Застосування МОР може сприяти як збільшенню, так і зменшенню залишкових напружень порівняно з обробкою без них. Характер впливу МОР на напруження 1-го роду значно залежить від кількості тепла, що виділяється у зоні різання. Це тепло визначає розвиток процесів роззміцнення у поверхневому шарі, а значить, впливає на його напруженість.

Стійкість залишкових напружень у процесі зношування залежить в основному, від величини залишкової деформації у поверхневих шарах пари тертя, яка визначає пружний, пружно-пластичний або пластичний контакти пар тертя.

При пружному контакті напруження у виступах не перевищують межі пружності. Це стосується випадку контакту відносно гладеньких або слабонавантажених поверхонь деталей, що працюють в умовах напіврідинного тертя.

Незначне зниження залишкових напружень вже спостерігається при навантаженнях до межі пружності (із залишковою деформацією до 0,005%). При навантаженнях до межі текучості залишкові напруження зменшуються до 60%. При подальшому навантаженні із залишковою деформацією до 0,5 – 1% напруження знімаються практично повністю. Проте, після розвантаження у цьому випадку виникають вторинні макронапруження, які обумовлюються неоднорідністю пластичної деформації по глибині поверхневого шару.

Первинні макронапруження у парах тертя зберігаються доти, поки спільна дія залишкових напружень і напружень від зовнішнього навантаження не виходить за межу пружного опору, обумовленого дуже малою величиною залишкової деформації. Початок появи пластичної деформації у поверхневих шарах спряжених деталей залежить від характеру розподілу первинних залишкових напружень і величини номінальних напружень. Якщо результуюча епюра напружень при накладанні залишкових напружень на напруження від зовнішнього навантаження буде характеризуватись зменшенням максимальних

напружень, то у цьому випадку залишкові макронапруження, збільшуючи запас міцності у пружній області, підвищують зносостійкість пари тертя. Навпаки, збільшення результуючих максимальних напружень порівняно з величиною напружень тільки від зовнішнього навантаження викликає негативний вплив залишкових напружень.

Таким чином, в умовах напіврідкого тертя, коли напруження у виступах не перевищують межу пружності (пружний контакт поверхонь), залишкові напруження можуть впливати на зносостійкість деталей.

Залишкові напруження стиску підвищують зносостійкість деталей, а напруження розтягу – знижують її. При пружно–пластичному контакті пар тертя, коли у поверхневих шарах виникає пластична деформація, інтенсивність і характер зношування деталей не залежить ні від величини, ні від знаку первинних залишкових напружень.

В умовах пластичного контакту пар тертя первинні залишкові напруження не впливають на зносостійкість поверхневого шару деталей. Первинні залишкові напруження уже у початковий момент зношування деталей ліквідуються пластичною деформацією і у поверхневому шарі пари тертя виникають нові, вторинні напруження. Величина, знак і характер розподілу вторинних залишкових напружень визначається умовами зношування і властивостями матеріалів пар тертя незалежно від початкового стану поверхні.

Залишкові напруження прискорюють процеси корозії. Проте, стискаючи напруження знижують інтенсивність корозії. Однак шорсткість поверхні і деформаційне зміцнення металу поверхневого шару є більш суттєвими факторами, що впливають на інтенсивність корозії. Корозійна стійкість різко знижується зі збільшенням шорсткості поверхні та наклепу.

Однією з основних причин передчасної втрати деталями машин початкової точності є короблення, що викликається релаксацією технологічних залишкових напружень. Ці напруження, що виникли в деталі, не залишаються постійними з часом. Пружні деформації, що викликаються цими напруженнями, поступово

переходять у пластичні, що супроводжуються частковою або повною ліквідацією первинних макронапружень.

Нерівномірність проходження релаксації напружень через різну величину залишкових напружень на різних ділянках змінює співвідношення між макронапруженнями, приводячи до пружної деформації деталі та зміни її геометричної форми і розмірів. Зовнішні навантаження та нагрівання деталей в умовах експлуатації прискорюють процеси релаксації напружень і можуть викликати також додаткові деформації.

Отже, надійна стабілізація геометричної форми деталі може бути забезпечена виключенням деформації як від залишкових макронапружень, так і від напружень, що викликаються зовнішніми навантаженнями. У практиці машинобудування для цієї мети використовуються різні технологічні процеси: природнє та штучне старіння, вібраційне старіння та ін.

Релаксація макронапружень супроводжується загальною деформацією деталі нерідко настільки значною, що вона спостерігається візуально або викликає руйнування (появу тріщин).

Для боротьби із залишковими напруженнями застосовують термічну обробку або холодну пластичну деформацію.

Термообробка дає сприятливі результати: знижується максимальна твердість, поліпшується структура поверхневого шару, знижуються або зовсім знімаються залишкові мікронапруження. Останнє пояснюється тим, що межа текучості при високих температурах різко знижується. При цьому починається пластична течія, і залишкові напруження знижуються до межі текучості металу, що відповідає високій температурі. Щоб запобігти можливому коробленню та спотворенню форми деталей складного профілю типу лопаток газотурбінних двигунів через наявність перепадів температур у процесі переходу від нагрівання до охолодження, необхідно забезпечити малі швидкості охолодження.

Метод зняття залишкових напружень холодною пластичною деформацією полягає у навантаженні деталі додатковим навантаженням, що викликає

гідростатичне навантаження, в результаті чого залишкові напруження суттєво знижуються.

Основні вимоги до травників і електролітів наступні: зняття металу повинно відбуватися рівномірно по усій поверхні, що досліджується; при травленні не повинні виникати додаткові напруження у результаті дифузії водню. Рекомендується перед початком травлення на відпалених зразках підібрати і перевірити травник і режим стравлювання. Електролітичне травлення при інших рівних умовах є переважним, оскільки змінюючи щільність струму, можна у відносно широких межах змінювати швидкість зняття металу, у відносно широких межах змінювати швидкість зняття металу та досягати її стабільності. Поверхні зразків, що не повинні стравлюватись і деталі підвіски захищаються стійкими покриттями. При температурах до 30 °С можна використовувати парафін і віск. Лаки ХВЛ – 21 Е1 слід використовувати при більш високих температурах.

Для видалення великих кількостей матеріалу при дослідженні розподілу залишкових напружень по осьовому перерізу товстостінних деталей із жаростійких, жароміцних сталей, з титанових сплавів та інших матеріалів, наприклад, після штамповки, лиття, термічної обробки, перспективним є застосування методів розмірної електрохімічної обробки поверхонь і розрізання. При цьому можуть бути використані універсальні верстати для електрохімічної обробки. Спеціальною оснасткою є тільки електроди і камери для установки і підведення електроліту до деталі.

Відомо, що залишкові напруження першого роду – це напруження, які за ознаками силового поля та фізичній суті охоплюють області, які співрозмірні з розмірами деталі [17].

Різноманітні методи ХПД можуть призвести до виникнення залишкових напружень. Ми вважаємо, що наявність стискуючих напружень може призвести до поліпшення наступної механічної обробки аустенітних сталей. Для перевірки висунутого положення була проведена серія відповідних експериментів.

У дослідженнях було використано механічний метод, заснований на тому, що розрізання та видалення частини трубчастої деталі із залишковими напруженнями еквівалентно прикладанню до її нових поверхонь напружень, які зворотні залишковим. За форму зразків брались трубчасті деталі, що попередньо піддавались холодній деформації величиною 50% методом поперечного стиснення. Поперечний переріз деталей дорівнював 75х8 мм. Процесом різання, як приклад, служило протягування із сумарним припуском на сторону 0,2 мм. Для порівняння протягувались також трубчасті деталі у незміцненому стані. У всіх випадках досліджувались лише дотичні залишкові напруження, оскільки, як відомо [17], радіальні та осьові залишкові напруження майже не впливають на напружено–деформівний стан деталей.

Дотичні залишкові напруження вивчались на кільцеподібних зразках із сталей марок 12X15Г9НД, 08X18Н10 та 40X13, висотою 10–12 мм, що були вирізані із трубчастих деталей. Застосовувалось електрохімічне травлення електролітом, що включав 45% ортофосфорної кислоти, 45% сірчаної кислоти і 10% води. Травлення відбувалось при температурі 20°C. Для побудови епюри розподілу залишкових напружень по всьому перерізу заготовки використовувались по дві заготовки, які спочатку розрізались дисковою фрезою по твірній. Для запобігання спотворення напружень у деталях, розрізання здійснювалось на режимах, при яких температура у зоні різання не перевищувала 70–80 °C. Після розрізання обидва зразки з однаковими залишковими напруженнями піддавались травленню – один із зовнішнього діаметру, другий – із внутрішнього на глибину 4 мм із постійною фіксацією розміру. Потім результати складались з отриманням величини частки від травлення. Ця величина додавалась до пружної деформації від розрізу і будувались епюри напружень по товщині деталі.

На рис. 4.4, як приклад, наведено розподіл дотичних залишкових напружень у поверхневому шарі товщиною до 2 мм, деталей із двох марок аустенітних сталей.

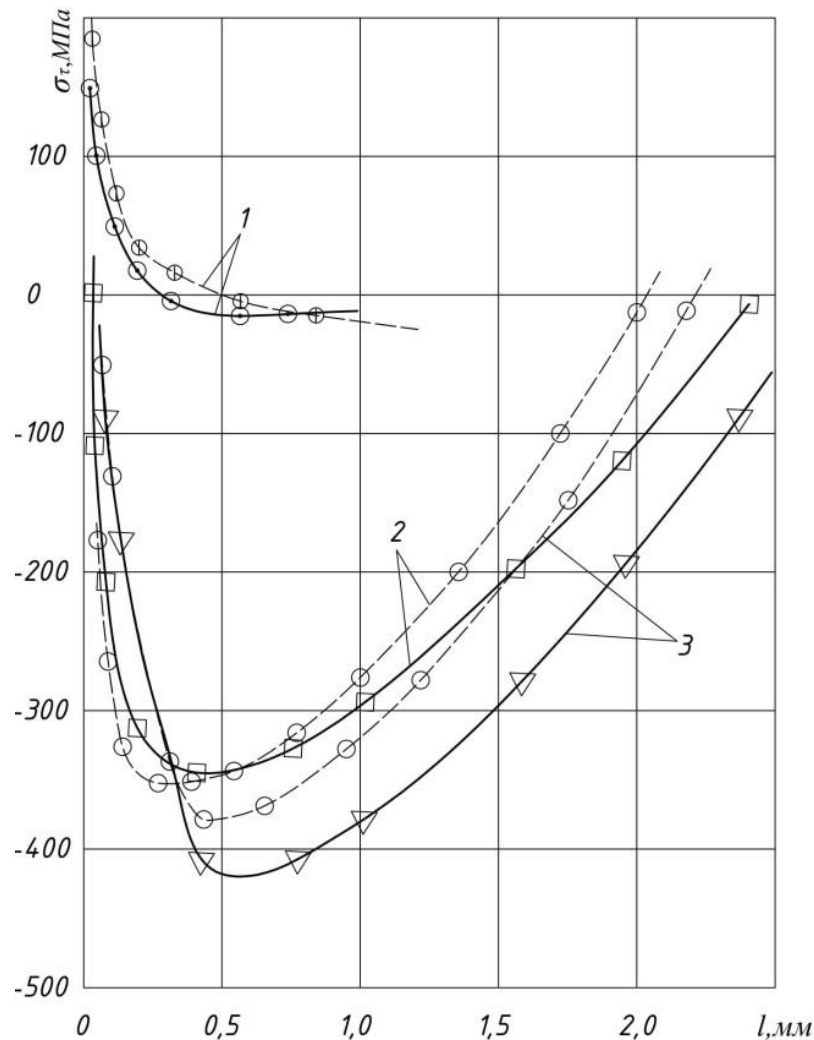


Рисунок 4.4 – Розподіл залишкових напружень σ_τ за товщиною стінок l у трубчатих деталях із аустенітних сталей 12X15Г9НД (штрихові криві) і 08X18Н10 (суцільні криві), які оброблено різальним протягуванням 1 (незміцнені сталі) та криві 2, 3 – сталі після ХПД

Таким чином, попереднє холодне пластичне деформування методом поперечного стиснення дозволяє отримати сприятливі для наступного процесу різання стискуючі напруження. Величина цих напружень перевищує межу текучості зміцнених аустенітних сталей у 1,5–3 рази. У процесі наступного різання при МОР на основі ріпакової олії значення цих напружень зменшуються. Стискуючі залишкові напруження особливо важливі також і для формування поверхневих захисних шарів (покриттів) при виготовленні та ремонті деталей із аустенітних сталей.

4.3. Повернення експлуатаційних властивостей деталей із аустенітних сталей прецизійною фінішною термічною обробкою

Повернення початкових експлуатаційних властивостей аустенітних сталей (високої зносостійкості, високої корозійної та теплостійкості, підвищеного опору зношуванню, а також набуття парамагнітних властивостей), тобто тих властивостей, якими ці сталі відзначались до холодного пластичного деформування і обробки різанням лезовим інструментом, здійснюється операціями відпускання. Це заключна (чистова) термічна обробка, яка полягає у нагріванні сталей до температур, нижчих від критичної точки A_{C1} (сталі системи «залізо–марганець», у нашому випадку сталь 110Г13Л) та критичної точки A_{C3} (сталі з низьким вмістом вуглецю, тобто системи «залізо–хром–нікель»). Після нагрівання аустенітні сталі потрібно витримати протягом 1,5–2 години і охолодити на повітрі у середовищі оливи, оскільки у нашому випадку мова йде про прецизійну термообробку.

Низькотемпературне відпускання (температура нагрівання 120–250 °С) не рекомендується, оскільки не призводить до структурних перетворень (отримання аустеніту), а гарантує лише зняття залишкових напружень. Високотемпературне відпускання (нагрівання до 500–700 °С) також не рекомендується, але з іншої причини. Хоча твердість сталі у цьому випадку падає до початкового рівня, значно зменшується тимчасовий опір, а границя текучості усе ж залишається на достатньо високому рівні, тобто підвищується пластичність, короблення деталей після цього виду відпускання є значним, що у ряді випадків недопустимо.

Таким чином, для повернення початкових експлуатаційних властивостей аустенітних сталей слід рекомендувати середньотемпературне відпускання (температура нагрівання 350–500 °С). При нагріванні до цих температур вуглець починає виділятися з кристалічної ґратки мартенситу з утворенням аустеніту і карбідів легуючих елементів. Особливістю структури є пластинчастість аустеніту і зерниста форма карбідних фаз (рис. 4.5).

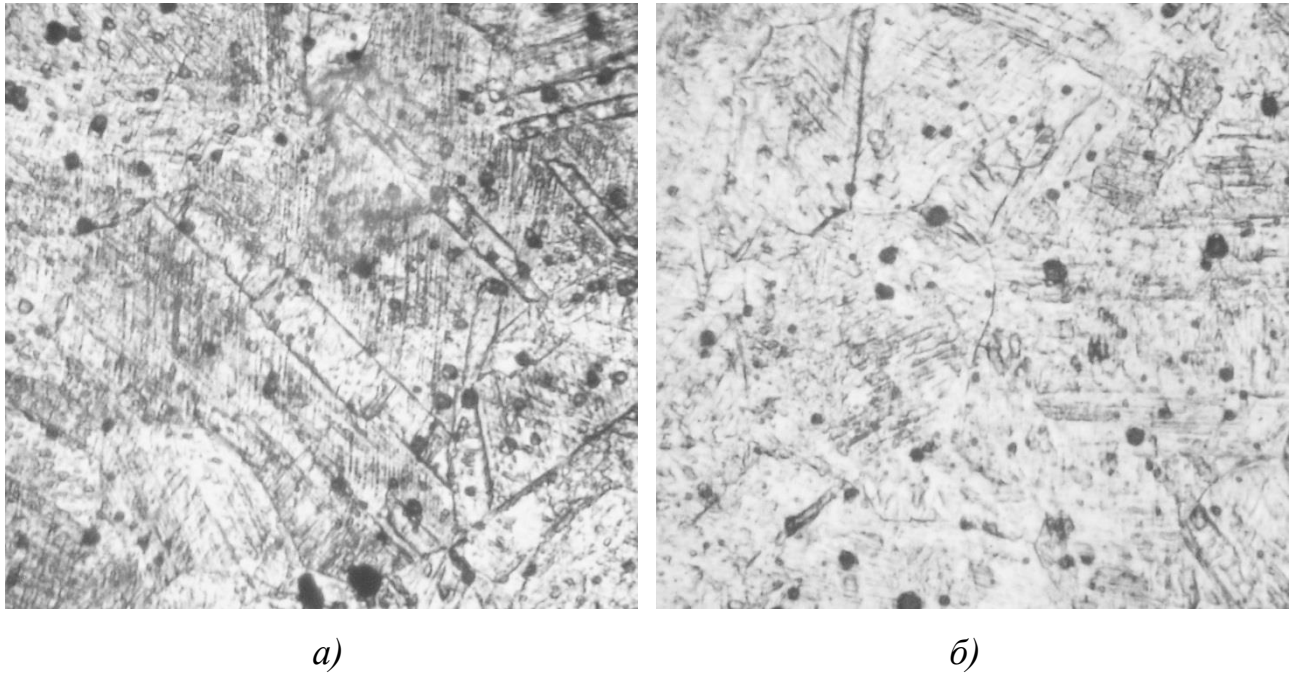


Рисунок 4.5 – Мікроструктура сталі 08X18N10 до середнього відпускання, а, і після середнього відпускання ($\Theta = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка 100 хв, середовище – ріпакова олія)

Після середнього відпускання знижується твердість і тимчасовий опір σ_{ϵ} , підвищується пластичність та ударна в'язкість, однак границя текучості σ_T залишається на високому рівні ($\sigma_T / \sigma_{\epsilon} = 0,9$).

На рис. 4.6, як приклад сказаному, наводяться зміни основних механічних властивостей сталі 08X18N10 після середнього відпускання. Перед відпусканням сталь було піддано холодній деформації ($\epsilon = 67\%$) та низькошвидкісній обробці різанням ($v = 26,5\text{ м/хв.}$).

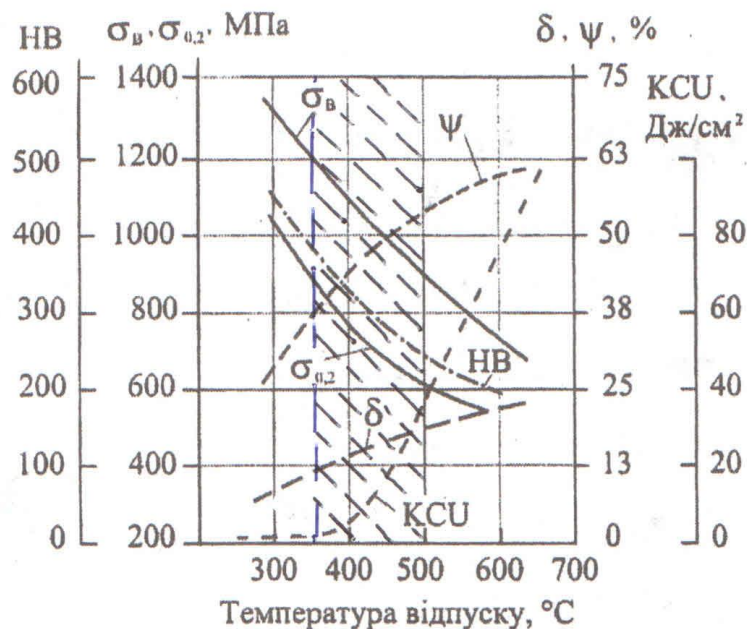


Рисунок 4.6 – Зміна механічних характеристик аустенітної сталі 08X18H10 від температури відпускання. Штриховими лініями обмежена область температур середнього відпускання

Ще один аргумент на користь середнього відпускання. У легованих аустенітних сталях при відпусканні в інтервалі 250–300 °C і 500–550 °C спостерігається відпускна крихкість (зниження ударної в'язкості). Причиною цього явища у першому діапазоні температур є нерівномірність розподілу карбідних частинок при розпаді мартенситу (відпускна крихкість I роду). У другому діапазоні температур спостерігається не тільки зниження ударної в'язкості, а і підвищення порогу холодноламкості (відпускна крихкість II роду). Сталі, леговані марганцем або сумісно хромом та нікелем, є найбільш схильними до відпускної крихкості II роду.

Діапазон температур середнього відпускання вільний від вказаних недоліків.

При необхідності заключною фінішною операцією деталей із аустенітних сталей рекомендується алмазно–абразивна обробка еластичним інструментом. Ця операція виконується обробкою стрічковим шліфуванням, полірування, хонінгування та суперфінішування у залежності від форми деталей. Обробка

еластичним інструментом не змінює розміри деталі, а лише видаляє окисні плівки, що виникають при фінішній термообробці (середньому відпусканні). Тому припуски на таку обробку знаходяться в межах 1–3 мкм (0,001–0,003 мм), а основні характеристики алмазного інструменту наступні: АСМ 3/2 – АСМ 40/28; зв'язки Р1, Р4, Р9, Р11; концентрація 25, 50, 100%; МОР – ріпакова олія.

4.4. Отримання порошків із аустенітних сталей для формування захисних покриттів

Порошки є матеріалом для формування захисних покриттів переважно наплавленням і напиленням. Відомі різноманітні технології отримання порошків, що для цього використовуються. Частинки отримують розпиленням дроту струменем плазми, розплавленням водою або газом високого тиску, механічним подрібненням зливка, осадженням з розчину з використанням газів – відновлювачів, термічною дисоціацією карбонільних сполук металів тощо.

Нами розроблено оригінальний спосіб отримання порошків із аустенітних сталей, який полягає у наступному. Заготовку із аустенітної сталі обробляють, наприклад, круглим поздовжнім або різним чорновим шліфуванням. Потім отриманий шлак подають у магнітні відстійники у яких сепаруються металеві феромагнітні і немагнітні частинки. Металеві частинки після сушки розділяють на фракції, після чого порошки готові для використання у методах інженерії поверхні для отримання захисних покриттів.

При шліфуванні найкраще використати дешеві електрокорундові круги прямого профілю діаметром до 400 мм, зернистістю 40 – 50 мкм, твердістю С1 – С2 структури 5. Зв'язуючою круга має бути немагнітна кераміка (К). При кінематичній схемі круглого поздовжнього шліфування рекомендуються наступні режими процесу: швидкість круга – $30 \div 35$ м/сек; швидкість зразка із аустенітної сталі – $40 \div 50$ м/хв; глибина шліфування – $0,01 \div 0,03$ мм; охолодження 1% водний розчин кальцинованої соди.

При реалізації способу отримання порошків із аустенітних сталей використовується досліджений нами ефект перетворення «аустеніт – мартенсит» при шліфуванні. Таким чином парамагнітний матеріал стає феромагнітним, що дає можливість використати при сепарації шлаку магнітні відстійники.

Удосконалені сучасні магнітні відстійники дозволяють вилучити зі шлаку до $80 \div 90\%$ металевих частинок. Зернистість отриманих порошків запропонованим способом, знаходиться в діапазоні $10 \div 300$ мкм.

Повернення експлуатаційних властивостей захисних покриттів (зносостійкості, теплостійкості, антикорозійних і фізико–механічних властивостей тощо) здійснюється на готовій деталі згідно з нашими рекомендаціями.

4.5. Розробка технологічного процесу оброблення деталей із аустенітних сталей

Результати дисертаційного дослідження лягли в основу технологічного процесу оброблення деталей із аустенітних сталей. Ключовою комбінованою операцією цього процесу є спосіб різання з попереднім холодним пластичним деформуванням у середовищі екологічно чистої ріпакової олії.

Спосіб належить до оброблення металів, а саме до оброблення різанням з попередньою деформацією та термообробкою.

Відомі такі способи оброблення сталей як: різання, точіння, свердління, фрезерування, шліфування, полірування, протягування, стругання, обробка тиском, абразивне оброблювання, хонінгування. Недоліками цих способів є низька продуктивність, токсичність процесу та велика вартість отримання кінцевого продукту. При застосуванні вищезгаданих способів, сталі оброблюються за допомогою різальних інструментів, абразивних частинок, стиснутого повітря або водяного струменю з допомогою мастильно–охолоджуючих речовин. Продуктивність даних способів залежить від режимів різання, тиску, величини абразивних частинок та вибору МОР. Бажані

результати досягаються шляхом поєднання наведених способів та допоміжних речовин.

Найбільш близьким за технічною суттю та сукупністю ознак є: отримання потрібних геометричних розмірів шляхом зняття/видалення певного шару оброблюваного матеріалу, використовуючи вищезгадані способи в поєднанні з мастильно–охолоджуючими рідинами. Недоліками наведених способів при обробці деталей засобів транспорту із аустенітних сталей є мала продуктивність, токсичність та велика вартість. Задача розроблюваного технологічного процесу – підвищення оброблюваності деталей засобів транспорту із аустенітних сталей.

Поставлена задача вирішується шляхом поєднання двох способів, а саме, холодного–пластичного деформування та різання. Оброблювану поверхню деталі засобів транспорту із аустенітних сталей попередньо піддають холодній пластичній деформації за одним з відомих методів холодної пластичної деформації, потім за допомогою різання у середовищі мастильно–охолоджуючих речовин, знімають потрібний шар матеріалу та відновлюють початкові властивості матеріалу шляхом прецизійної термообробки.

Спосіб оброблення аустенітних сталей реалізовується послідовним виконанням декількох процесів, а саме, спочатку оброблювану поверхню деталі піддають холодному–пластичному деформуванню, одним з існуючих методів. Потім поверхню оброблювальної деталі, в зоні застосування холодної пластичної деформації, оброблюють різанням за однією з існуючих схем різання. Завершальною дією в цьому способі є термообробка, яка повертає поверхні оброблювальної деталі всі початкові фізико–механічні властивості. Ця схема технологічного процесу оброблення аустенітних сталей за результатами дисертаційного дослідження лягла в основу патенту [133].

Висновки до розділу 4

Проведені експерименти показали позитивний вплив попереднього ХПД та застосування МОР рослинного походження на процес формування валика

стружки, що дозволяє підвищити коефіцієнт заповнення канавок РІ, зокрема протяжок, на 40–42%. Це є особливо важливим при різанні інструментами з примусовим формуванням стружки в обмеженому просторі. Також встановлено оптимальну величину зрізувального шару при обробці аустенітних сталей, яка лежить в межах від 0,02 до 0,05 мм.

Встановлено, що стискаючі залишкові напруження, які виникають у поверхневому шарі в процесі попереднього ХПД, позитивно впливають на підвищення оброблюваності аустенітних сталей. Після завершення обробки, залишкові напруження повністю знімаються при фінішній термообробці.

Розроблено технологічний процес оброблення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей, який полягає у виконанні наступної послідовності технологічних операцій: миття – дефектування – сортування – ХПД – обробка різанням з МОР рослинного походження – фінішна термообробка.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних досліджень в межах дисертаційної роботи вирішено науково–технічне завдання розширення використання аустенітних сталей для виготовлення та відновлення деталей засобів транспорту, зокрема гусеничної ходової частини, газорозподільчого механізму, наддуву дизелів, вузлів вихлопу тощо. Це стало можливим завдяки наступному.

1. Розроблено математичну модель процесу обробки аустенітних сталей різанням, що визначає вплив значимих факторів: величини попередньої холодної пластичної деформації, виду екологічно чистої мастильно–охолоджувальної рідини рослинного походження та швидкості різання у межах 5–50 м/хв.

2. Уперше встановлена роль збільшення густини дислокацій на один–два порядки та фазових структурних перетворень «аустеніт – мартенсит», ініційованих холодною пластичною деформацією, на поліпшення оброблюваності аустенітних сталей за рахунок поліпшення контактних процесів на передній поверхні інструменту, зокрема зменшення повної довжини контакту на 50–60% і середнього коефіцієнта тертя з 2–2,5 до 0,9–1,5.

3. Встановлено, що використання мастильно–охолоджувальних рідин на основі рослинних масел у порівнянні із застосуванням рідин на основі мінеральних масел призводить до поліпшення оброблюваності аустенітних сталей, причому оптимальними у розробленому ранжувальному ряді є екологічно чисті рідини на основі ріпакової олії

4. Досліджено параметри різання аустенітних сталей, зміцнених холодною пластичною деформацією при застосуванні ріпакової олії, причому при передньому куті інструменту із сталі Р6М5 $\gamma = 15\text{--}20^\circ$, швидкостях різання 5–50 м/хв, забезпечується зниження середньої температури різання до 10%; складових сил різання P_z та P_y на 10–30%; коефіцієнта усадки стружки до 1,8; повної довжини контакту по передній поверхні до 1,9 раз; і зниження інтенсивності наростоутворення до 20 раз.

5. Розроблено метод об'ємного холодного пластичного деформування металевих матеріалів, який полягає у поперечному стисканні циліндричних заготовок перпендикулярно осі. При силах стиснення до 63 МН забезпечується величина деформації до 90%.

6. Установлено, що попереднє холодне пластичне деформування аустенітних сталей та інтенсифікація різання цих сталей мастильно-охолоджувальною рідиною на основі ріпакової олії дозволяє підвищити допустимий коефіцієнт заповнення стружкових канавок до 0,55–0,65.

7. Розроблено і запропоновано для виробництва технологію виготовлення та відновлення деталей засобів транспорту за наступною послідовністю основних операцій: холодне пластичне деформування – обробка різанням – повернення початкових властивостей деталей середнім відпусканням у захисному середовищі на основі аргону. Технологія рекомендується для деталей газорозподільчого механізму, ходової частини, зокрема гусеничної, систем вихлопу відпрацьованих газів тощо. Результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальних дисциплінах Національного транспортного університету, спеціальність “Прикладна механіка”: «Технологія конструкційних матеріалів» та «Основи інженерії поверхні деталей машин та конструкцій».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brandon Ford C. Annealing aids machinability // Metal Progr, 1970. – 98. – № 1. – P. 103–105.
2. Enahoro H.E. Effekt of cold-working on chip formation in metal cutting // Ann. C.S.R.P., 1966. – № 3 (13). – P. 251–261.
3. Hrubec Jan. Vplyv spevnenia obrobenej plochy na drsnost povrchy pri resani austenitikych nehrdzavejucich chromnikovych oceli // Zb. ved. pr. strojn. fak. SVST Bratislave, 1968. – № 8. – P. 10/1–10/16.
4. Inturi R.B. Localized Corrosion of Nanocrystalline 304 Type Stainless Steel Films / R.B. Inturi, Z. Szklarska-Smialowska // Corrosion, 1992. – V. 48. – P. 398.
5. Keck Kurt. Spanende Nachbearbeitung von Kaltumformwerkstücken // Industrie-Anzeiger, 1967. – № 4 (89). – S. 12–16.
6. Trend Edward M., Wright Paul K. Metal cutting. – 4th ed. – Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. – 446 p.
7. Абуладзе Н.Г. Характер и длина пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента / Н.Г. Абуладзе // Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов. – Куйбышев: Куйбышевское областное книжное издательство, 1962. – С. 68–78.
8. Аксьом П.А. Дослідження холодного пластичного деформування методом поперечного стискання / П.А. Аксьом // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Матеріали конференції. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2016. – С. 16–17.
9. Алифанов А.Я. Пластические деформации при комбинированном резании с искусственным нагревом зоны стружкообразования / А.Я. Алифанов // Физические процессы при резании металлов. Сб. научн. тр. – Волгоград: Волгоград. политехн. ин-т, 1986. – С. 17–20.
10. Армарего И.Дж.А. Обработка металлов резанием / И.Дж.А. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.

11. Баев А.К. Влияние изменения механических свойств при наклепе стали на усилия резания / А.К. Баев // Труды Харьковского политехнического института. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1962. – Вып. 19. – С. 33–44.
12. Берлинер М.С. Процессы протягивания деталей на ЗИЛе / М.С. Берлинер // Новые протяжные станки и прогрессивные методы протягивания. – М.: НИИМАШ, 1966. – С. 73–78.
13. Бобров В.Ф. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1967. – 414 с.
14. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента / В.З. Бродский. – М.: Наука, 1976. – 223 с.
15. Вереина Л.И. Справочник станочника: учеб. пособие для нач. проф. образования / Л.И. Вереина, М.М. Краснов. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 560 с.
16. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
17. Виноградов А.А. Обработка резанием труднообрабатываемых материалов / А.А. Виноградов, В.А. Резников // Л.: ЛДНТП, 1970. – Ч. 1. – С. 24–31.
18. Виноградов А.А. Расчет усадки стружки и длины контакта ее с резцом / А.А. Виноградов // Сверхтвердые материалы, 1980. – Вып. 2. – С. 58–63.
19. Виноградов А.А. Теоретическое определение силы стружкообразования при резании металлов / А.А. Виноградов // Технология и автоматизация машиностроения, 1978. – Вып. 22. – С. 13–19.
20. Воеводин Г.А. Влияние микроструктуры обрабатываемого материала на характеристики процесса резания и износ инструмента / Г.А. Воеводин // Физические процессы при резании металлов. Сб. научн. тр. – Волгоград: Волгогр. политехн. ин-т, 1984. – С. 76–86.
21. Войтов В.В. Обработка резанием с одновременным пластическим деформированием / В.В. Войтов, В.Н. Подураев, Л.В. Севастьянов,

Г.Ф. Шатуров // Интенсификация технологических процессов механической обработки: Прогрессивные режущие инструменты, устройства и способы обработки: Тез. докл. всесоюз. конф. 14–16 октября 1986 года. – Л., 1986. – С. 35–36.

22. Грановский Г.И. Расчет и конструирование протяжек. – М.: Машгиз, 1960. – 252 с.

23. Грановский Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, П.П. Грудов. – М.: Машгиз, 1954. – 472 с.

24. Грязнов И.М. Об обрабатываемости холодноволокоченных калиброванных сталей 35 и 40 / И.М. Грязнов // Вестник металлопромышленности. – М.: Госмашметиздат, 1937. – № 10. – С. 59–64.

25. Джунусбеков Ж.К. Повышение эффективности деформирующе–режущего протягивания на основе совершенствования деформирующих элементов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1980. – 27 с.

26. Дмитриченко Н.Ф. Тенденции поверхностного упрочнения зубчатых колес в автомобилестроении / Н.Ф. Дмитриченко, Б.А. Ляшенко, Э.К. Посвятенко // Надійність і довговічність машин і споруд. – К.: Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, 2005. – Вип. 24. – С. 127–144.

27. Дурягіна З.А. Сплави з особливими властивостями / З.А. Дурягіна, О.Я. Лизун. – Львів: Львівська політехніка, 2007. – 236 с.

28. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.

29. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1977. – 288 с.

30. Еремин А.Н. Физическая сущность явлений при резании сталей. – М.: Машгиз, 1951. – 226 с.

31. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.

32. Зорев Н.Н. Исследование процесса резания металлов в США: Механика процесса резания. – М.: НИИМАШ, 1965. – 126 с.
33. Зорев Н.Н. Исследование процесса резания металлов в США: Обрабатываемость металлов и износ режущего инструмента. – М.: НИИМАШ, 1967. – 124 с.
34. Иванов И.И. Основы теории обработки металлов давлением: учебник / И.И. Иванов [и др.]. – М.: ФОРУМ: ИНФРА–М, 2007. – 144 с.
35. Инструменты из сверхтвёрдых материалов / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
36. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: Учебник / А.И. Грабченко [и др.]; ред. А.И. Грабченко, В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.
37. Ишмаков Р.А. Особенности обрабатываемости деформационно–упрочнённых материалов / Р.А. Ишмаков, П.А. Семкин, Л.А. Хворостухин // Интенсификация технологических процессов механической обработки: Физические явления и динамические процессы в технологических системах: Тез. докл. всесоюз. конф. 14–16 октября 1986 года. – Л., 1986. – С. 55.
38. Иванов Ю.М. До питання механіки процесів комбінованої холодної обробки отворів деталей транспортних засобів / Ю.М. Иванов // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: зб. наук. пр. – Київ: НТУ, ТАУ, 1999. – Вип. 6. – С. 23–26.
39. Иванов Ю.М. До розрахунку деформуючих інструментів, що працюють за схемою ковзання / Ю.М. Иванов // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. – Київ: НТУУ “КПІ”, 1999. – Вып. 37. – С. 162–168.
40. Иванов Ю.М. Сучасні ресурсозберігаючі технології виробництва та ремонту виконавчих органів гідросистем автомобілів і тракторів / Ю.М. Иванов, Ю.Б. Паладійчук // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 1999. – Вип. 28. – С. 286–289.

41. Іванов Ю.М. Холодне пластичне деформування як засіб інженерної поверхні деталей машин / Ю.М. Іванов, Е.К. Посвятенко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – № 6. – С. 110–113.
42. Іванов Ю.М. Шляхи удосконалення ресурсозберігаючих комбінованих технологічних процесів виготовлення та ремонту деталей транспортних засобів / Ю.М. Іванов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, 1999. – Вып. 55. – С. 129–134.
43. Інженерія поверхні. Підручник / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К.: Наук. думка, 2007. – 559 с.
44. Калинин Б.А., Волков Н.В., Польский В.И. Растровая электронная микроскопия. Лабораторная работа. – М.: МИФИ, 2008. – 56 с.
45. Канарчук В.Є. Деформаційне зміцнення конструкційних і легованих сталей / В.Є. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: зб. наук. пр. – Київ: НТУ, ТАУ, 2002. – Вип. 13. – С. 7–12.
46. Канарчук В.Е. Прикладное автотракторное материаловедение: Учеб. пособие / В.Е. Канарчук, В.И. Шевченко. – К.: УМК ВО, 1991. – С. 84–88.
47. Кацев П.Г. Справочник протяжника / П.Г. Кацев, Н.П. Елифанов. – М.: Машгиз, 1963. – 256 с.
48. Кацев П.Г. Обработка протягиванием: Справочник / П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 159–162.
49. Кириллов П.Г. Теория обработки металлов давлением / П.Г. Кириллов. – М.: Высшая школа, 1965. – 296 с.
50. Киселев Е.С. Научные основы и технология применения смазочно–охлаждающих технологических средств при механической обработке: сборник учебно–исследовательских лабораторных работ / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 57 с.

51. Клушин М.И. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием / Под. ред. М.И. Клушина. – М.: Машиностроение, 1979. – 192 с.
52. Континуальная и дискретно–континуальная модификация поверхности деталей: Монография / Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко [и др.]. – Х.: “Щедра садиба плюс”, 2015. – 259 с.
53. Кудрявцев В.С. Влияние смазки на процесс резания меди. – М. – Свердловск: Машгиз, 1951. – 76 с.
54. Кузнецов А.М. Обработка комбинированным протягиванием круглых отверстий в деталях из вязких материалов / А.М. Кузнецов, А.З. Марин // Автомобильная промышленность, 1970. – № 4. – С. 33–35.
55. Кузнецов А.М. Технологические и физические основы деформирующе–режущих методов обработки / А.М. Кузнецов // Автомобильная промышленность, 1974. – № 12. – С. 4–9.
56. Курченко А.И. Влияние марганца на обрабатываемость конструкционных сталей / А.И. Курченко, Е.В. Бородина // Физические процессы при резании металлов. Сб. научн. тр. – Волгоград: Волгогр. политехн. ин–т, 1984. – С. 87–88.
57. Курченко А.И. К оценке эффективности применения двухкарбидных сплавов при обработке кальцийсодержащей стали / А.И. Курченко, В.В. Ананьин, Г.А. Воеводин // Физические процессы при резании металлов. Сб. научн. тр. – Волгоград: Волгогр. политехн. ин–т, 1985. – С. 28–34.
58. Латышев В.Н. Повышение эффективности СОЖ. – 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 64 с.
59. Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
60. Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента. – М.: Машгиз, 1958. – 355 с.
61. Малиновский Г.Т. Масляные смазочно–охлаждающие жидкости для обработки металлов резанием. – М.: Химия, 1988. – 192 с.

62. Маргулис Д.К. Повышение эффективности протягивания. – Рига: Риж. политехн. ин-т, 1986. – 198 с.
63. Маргулис Д.К. Протяжки переменного резания. – М. – Свердловск: Машгиз, 1962. – 269 с.
64. Марин А.З. Исследование процесса одновременного пластического деформирования и резания при протягивании (прошивании) отверстий деталей из вязких материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М, 1969. – 27 с.
65. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов, В.Н. Марков / Под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
66. Матеріалознавство: Підручник / За ред. проф. С.С. Дяченко. – Х.: ХНАДУ, 2007. – 440 с.
67. Металлография железа. Т.2 – Структура сталей (с атласом микрофотографий) / Перев. с. англ. – М.: Металлургия, 1972. – 284 с.
68. Механіка комбінованого протягування графітовмісних чавунів: Монографія / Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, О.В. Чернявський, П.М. Єрьомін; за ред. проф. Посвятенка Е.К. – Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2017. – 288 с.
69. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 208 с.
70. Ольшанецкий В.Е. О структурной и магнитной стабильности аустенита в хромоникелевых и марганцевых сталях при холодной деформацией / В.Е. Ольшанецкий // Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Фолиум, 2016. – Вып. №6 (732). – С. 3–10.
71. Пашкеев И.Ю. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ: учебное пособие / И.Ю. Пашкеев, О.В. Самойлова, В.И. Гераскин, Т.М. Лонзингер; под общ. ред. Г.Г. Михайлова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 47 с.
72. Посвятенко Э.К. Гибридные процессы инженерии поверхности деталей машин / Э.К. Посвятенко // Инженерия поверхности и реновация

изделий: Материалы 8-й межд. науч. –техн. конф. – К.: АТМ Украины, 2008. – С. 195–198.

73. Повсятенко Э.К. Повышение износостойкости коленчатых валов форсированных дизелей большой мощности / Э.К. Повсятенко, В.Д. Гончаров, С.С. Дьяченко // Резание и инструмент в технологических системах. – 2009. – Вып. 77. – С. 53–65.

74. Подураев В.Н. Влияние обработки резанием с опережающим пластическим деформированием на предел выносливости обработанных деталей / В.Н. Подураев, В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева // Известия высших учебных заведений МВО СССР. Сер. Машиностроение, 1971. – № 8. – С. 121–124.

75. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. – 590 с.

76. Подураев В.Н. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / В.Н. Подураев, В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева // Вестник машиностроения, 1971. – № 4. – С. 64–65.

77. Подураев В.Н. Физико–химические методы обработки / В.Н. Подураев, В.С. Камалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.

78. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М.Ф. Полетика. – М.: Машиностроение, 1969. – 148 с.

79. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. – М.: СКРИПТ, 1995. – 832 с.

80. Повсятенко Е.К. Геометричні та фізико–механічні характеристики поверхонь деталей після холодного деформування / Е.К. Повсятенко, Ю.М. Іванов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2001. – Вип. 30. – С. 128–131.

81. Повсятенко Е.К. Наукове підґрунтя процесів модифікування матеріалів холодним пластичним деформуванням / Е.К. Повсятенко,

Ю.М. Іванов // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – Вип. №1 (4). – С. 219–227.

82. Посвятенко Е.К. Основи розрахунку комбінованого інструменту для процесів на базі протягування / Е.К. Посвятенко, Ю.М. // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, 2001. – Вып. 59. – С. 171–175.

83. Посвятенко Е.К. Протягування як спосіб інженерії поверхні деталей транспортних засобів / Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов // Автошляховик України, 2003. – Окремий випуск №6. – С. 126–129.

84. Посвятенко Е.К. Ресурсозберігальні процеси механічної обробки гідроциліндрів автомобілів сімейств ЗІЛ і КамАЗ для комунального господарства / Е.К. Посвятенко, Ю.Б. Паладійчук, Ю.М. Іванов // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: зб. наук. пр. – Київ: НТУ, ТАУ, 2000. – Вип. 10. – С. 89–97.

85. Посвятенко Е.К. Відновлення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. – К.: НТУ, 2015. – Вип. №2 (32). – С. 210–218.

86. Посвятенко Е.К. Вплив дискретних покриттів та холодного пластичного деформування на дисипативні властивості матеріалів / Е.К. Посвятенко, А.П. Яковлев, О.В. Мельник, А.М. Безрукавий // Вісник Національного транспортного університету: в 2-х ч. – К.: НТУ, 2008. – Вип. 17. – Ч. 1. – С. 19–22.

87. Посвятенко Е.К. Механіка процесу різання пластичних металів після холодного деформаційного зміцнення / Е.К. Посвятенко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, 1995-1996. – Вып. 50. – С. 149–154.

88. Посвятенко Е.К. Основні напрямки поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом, Р.В. Будяк // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. – К.: НТУ, 2016. – Вип. №1 (34). – С. 370–377.

89. Посвятенко Е.К. Особенности механики резания материалов, деформированных холодной деформацией / Е.К. Посвятенко, Н.И. Посвятенко, Р.В. Будяк // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков, 2012. – Вып. 81. – С. 238–248.

90. Посвятенко Е.К. Особенности обработки деталей транспортных средств из аустенитных сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. – К.: НТУ, 2015. – Вип. №1 (31). – С. 443–449.

91. Посвятенко Е.К. Поліпшення експлуатаційних показників комбінованого протяжного інструменту / Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2000. – Вип. №1 (3). – С. 200–202.

92. Посвятенко Е.К. Про вплив дислокацій на фізико–механічні властивості феритних та аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом, О.В. Мельник // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 17–го Международного научно–технического семинара, 20–24 февраля 2017 г., г. Свалява. – Киев: АТМ Украины, 2017. – С. 239–241.

93. Посвятенко Е.К. Про фізичну природу поліпшення оброблюваності аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, Н.І. Посвятенко, П.А. Аксьом // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 17–й Международной научно–технической конференции, 29 мая – 02 июня 2017 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украина, 2017. – С. 48–53.

94. Посвятенко Е.К. Розробка наукових основ поліпшення оброблюваності деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Науковий журнал, серія “Технічні науки”. – К.: НТУ, 2016. – Вип. 18, Ч. 1. – С. 94–100.

95. Посвятенко Э.К. Влияние предварительного пластического деформирования на качество поверхности после чистовой обработки /

Э.К. Посвятенко // Сверхтвердые материалы для промышленности. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1972. – С. 213–215.

96. Посвятенко Э.К. Исследование обрабатываемости металла, упрочненного черновым деформирующим протягиванием: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1973. – 29 с.

97. Посвятенко Э.К. Малоотходная технология изготовления поршневых пальцев на основе редуцирования трубных заготовок / Э.К. Посвятенко, А.Д. Крицкий, Р.А. Маслов // Кузнечно–штамповочное производство, 1987. – №7. – С. 12–13.

98. Посвятенко Э.К. Наростообразование при протягивании стали, упрочненной холодной деформацией / Э.К. Посвятенко, И.В. Лунгол // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч. –техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 1997. – Вып. 51. – С. 195–198.

99. Посвятенко Э.К. Научное обоснование эффективности процесса деформирующе–режущего протягивания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Посвятенко Эдуард Карпович; Ин-т сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – К., 1993. – 35 с.

100. Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн. – техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 1999. Вып. 55. – 244 с.

101. Равська Н.С. Металорізальні інструменти: Підручник / Н.С. Равська, П.П. Мельничук, Р.П. Родін. – Житомир: ЖДТУ, 2016. – 612 с.

102. Розенберг А.М. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием / А.М. Розенберг [и др.]. – К.: Наук. думка, 1977. – С. 83–89.

103. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг. – Київ: Наукова думка, 1990. – 320 с.

104. Розенберг А.М. Обрабатываемость сталей, предварительно упрочненных деформирующим протягиванием / А.М. Розенберг, Э.К. Посвятенко // Вестник машиностроения, 1972. – № 11. – С. 49–51.

105. Розенберг А.М. Особенности конструкции протяжек, работающих по предварительно упрочненному металлу / А.М. Розенберг, Э.К. Посвятенко // Синтетические сверхтвердые материалы и твердые сплавы. – Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1973. – С. 257–264.

106. Розенберг А.М. Экспериментальное исследование процесса образования металлической стружки / А.М. Розенберг // Известия Сибирского технологического института. – Томск: Красное знамя, 1929. – Т. 51, вып IV. – С. 1–58.

107. Розенберг А.М. Элементы теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.Н. Еремин. – М. – Свердловск: Машгиз, 1956. – 319 с.

108. Розенберг О.А. Особенности работы режущих протяжек по металлу, упрочненному деформирующим протягиванием / О.А. Розенберг, Э.К. Посвятенко // Тракторы и сельхозмашины. – М.: Московский политехнический университет, 1970. – № 10. – С. 43–45.

109. Русские ученые – основоположники науки о резании металлов. Жизнь, деятельность и избранные труды / Под ред. Г.И. Грановский и К.П. Панченко – М., 1952. – 479 с.

110. Сангвал К. Травление кристаллов: Теория, эксперимент, применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 492 с.

111. Скиженок В.Ф. Высокопроизводительное протягивание / В.Ф. Скиженок, В.Д. Лемешонок, В.П. Цегельник. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.

112. Смазочно–охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин [и др.]; ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.

113. Справочник технолога–машиностроителя. В 2–х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

114. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов: Производственно–техн. изд–е / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

115. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степнов, А.В. Шаврин. – М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.
116. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Белоруская навука, 1998. – 583 с.
117. Усачев Я.Г. Явления, происходящие при резании металлов / Я.Г. Усачев // Русские ученые – основоположники науки о резании металлов. – М.: Машгиз, 1952. – С. 356–387.
118. Фельдштейн Э.И. Обрабатываемость холоднотянутых сталей на токарных автоматах / Э.И. Фельдштейн, Б.И. Наумов, В.В. Коняшов, А.И. Рязанов // Вестник металлопромышленности. – М.: Госмашметиздат, 1959. – № 3. – С. 21–24.
119. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах: Пер с англ. / Г. Хакен. – М.: Мир, 1985. – 419 с.
120. Ховах Н.И. Расчет сил резания при точении закаленной и упрочненной стали и влияние твердости на закономерности этого процесса: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1966. – 21 с.
121. Цуканов В.Н. Разработка способа дробления стружки и выбор его эффективных технологических параметров при точении с опережающим пластическим деформированием специзделий из труднообрабатываемых сталей и сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1987. – 16 с.
122. Шацких И.И. Повышение эффективности метода деформирующе-режущего протягивания отверстий на основе совершенствования его характеристик: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1988. – 16 с.
123. Шевеля В.В. Фреттинг–усталость металлов / В.В. Шевеля, Г.С. Калда. – Хмельницький: Поділля, 1998. – 300 с.
124. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента: Пер. с англ. / Шенк Х. – Москва: Мир. – 1972. – 381 с.

125. Щеголев А.В. Конструирование протяжек. – М. – Л.: Машгиз, 1969. – 352 с.
126. Ярославцев В.М. Влияние деформационной структуры анизотропии обрабатываемых материалов на силу резания // Известия высших учебных заведений МВО СССР. Сер. Машиностроение, 1976. – № 12. – С. 156–159.
127. Ярославцев В.М. Разработка основ метода резания с опережающим пластическим деформированием с целью интенсификации обработки и повышения качества изготовления деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М., 1986. – 32 с.
128. Ярославцева Н.А. Исследование влияния напряженного состояния материала на процесс резания / Н.А. Ярославцева // Известия высших учебных заведений МВО СССР. Сер. Машиностроение, 1971. – № 2. – С. 186–189.
129. Influence a material and the technological factors on improvement of operation properties of machine parts by reliefs and film coatings / E. Posviatenko, N. Posviatenko, R. Budyak, L. Shvets, Ju. Paladiichuk, P. Aksom, I. Rybak, B. Sabadash, V. Hryhoryshen. Eastern–European journal of enterprise technologies. 2018. № 5/12 (95). P. 48–56.
130. Посвятенко Е. К. Вплив попередньої холодної деформації і рослинних мастильно–охолоджуючих рідин на фізико–механічні та технологічні властивості аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Н. І. Посвятенко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – С. 172 – 178.
131. Посвятенко Е. К., Аксьом П. А. Про природу впливу деформаційного зміцнення на оброблюваність аустенітних сталей. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2019. – Вип. 3 (45). – С. 113 – 121.
132. Посвятенко Е. К. Поліпшення властивостей аустенітних сталей як конструкційного матеріалу / Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 6

seria: Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2015, s. 113 – 118.

133. Пат. 118017 Україна, МПК (2017.01) C21D 8/00. Спосіб оброблення аустенітних сталей / Посвятенко Е. К., Аксьом П. А. Власник Національний транспортний університет. – № а 2016 08413; заявл. 01.08.2016; опубл. 25.07.2017. Бюл. № 14.

134. Посвятенко Е. К. Основний напрямок підвищення оброблюваності аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 14-го Международного научно-технического семинара, 24–28 февраля 2014г., г. Свалява. – Киев: АТМ Украины, 2014. – С. 189 – 192.

135. Посвятенко Е. К. Математична модель обробки деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 16-й Международной научно-практической конференции, 20 – 23 сентября 2016 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2016. – С. 122 – 126.

136. Дослідження холодного пластичного деформування методом поперечного стискання / П. А. Аксьом // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатація машинобудівних конструкцій: Матеріали конференції. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2016. – С. 16 – 17.

137. Посвятенко Е. К. Визначення фактичного складу аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // 13-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2017. – С. 187 – 188.

138. Посвятенко Е. К. Поліпшення оброблюваності різанням пластичних матеріалів / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // 14-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2019. – С. 163 – 164.

139. Сніжної Г.В. Вплив магнітного стану аустенітної матриці на механічні властивості сталі AISI 321 / Г.В. Сніжної // Двигатели и

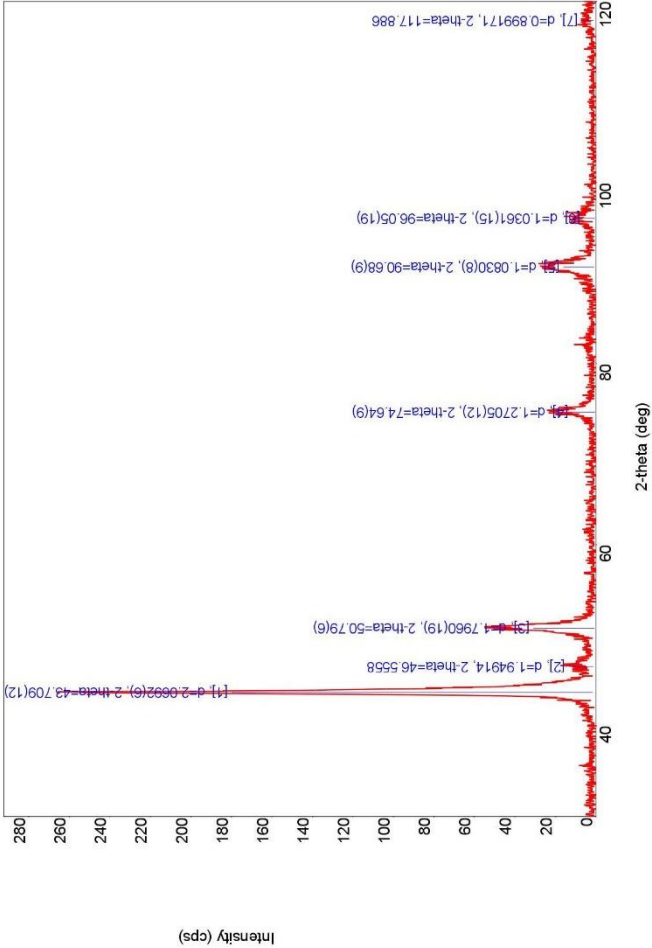
энергоустановки аэрокосмических летательных аппаратов. – 2014. – №7 (114). – С. 105 – 109.

140. Кузнецов В.Д. Наросты при резании и трении: Монография / В.Д. Кузнецов. – М.: Государственное издательство технико–теоретической литературы, 1956. – 284 с.

141. Прикладне матеріалознавство: Підручник / О.В. Сушко, Е.К. Посвятенко, С.В. Кюрчев, С.І. Лодяков. – Мелітополь: ТОВ «Forward press», 2019. – 352 с.

Analysis Results

General Information			
Analysis date	2018/09/21 12:31:30	Measurement date	2018/09/13 10:33:18
Sample name	AISI201_initial	Operator	User1
File name	AISI201_initial.raw		
Comment			
Measurement profile			

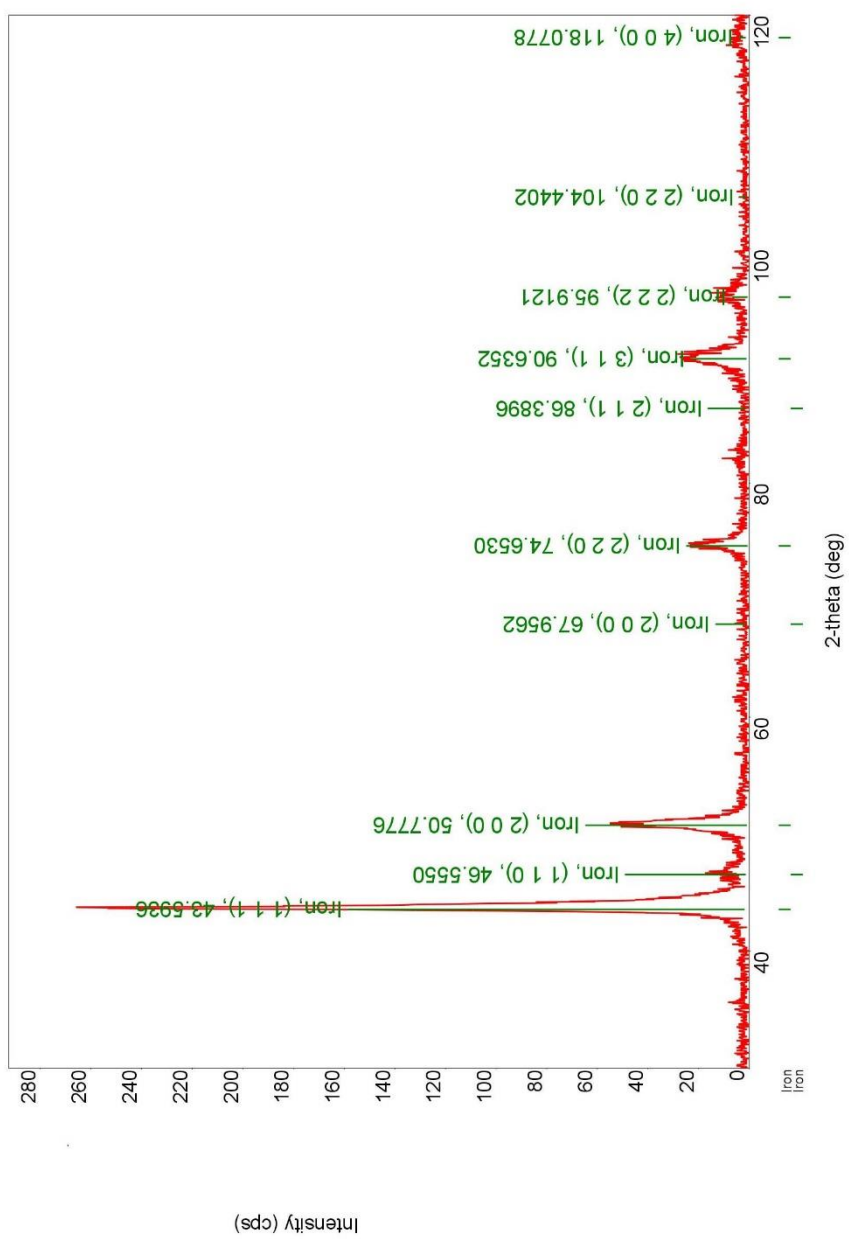


Measurement conditions

X-Ray	30 kV , 30 mA	Scan speed / Duration time	2.0000 deg./min.
Goniometer		Step width	0.0400 deg.
Attachment	-	Scan axis	2theta/theta
Filter		Scan range	30.0000 - 120.0000 deg.
CBO selection slit	-	Incident slit	1/2deg.
Diffrected beam mono.	Fixed Monochro.(U4)	Length limiting slit	-
Detector	Scintillation counter	Receiving slit #1	1/2deg.
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	0.45mm

Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Iron	Fe	0.387	User (COD)	9008469
Iron	Fe	1.450	User (COD)	9000667
Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Iron	Fe	225 : Fm-3m	User (COD)	9008469
Iron	Fe	229 : Im-3m	User (COD)	9000667



Peak list

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Size(ang.)	Phase name
1	43.709(12)	2.0692(6)	178(12)	122(2)	0.68(6)	208(8)	Iron(1,1,1)
2	46.5558	1.94914	11.9138	9.13927	0.767116	92.349	Iron(1,1,0)
3	50.79(6)	1.7960(19)	30(5)	32.4(12)	1.1(2)	105(6)	Iron(2,0,0)
4	74.64(9)	1.2705(12)	11(3)	11.9(7)	1.1(4)	107(7)	Iron(2,2,0)
5	90.68(9)	1.0830(8)	15(3)	21.8(10)	1.5(4)	88(4)	Iron(3,1,1)
6	96.05(19)	1.0361(15)	5(2)	6.0(8)	1.3(7)	103(12)	Iron(2,2,2)
7	117.886	0.899171	5.54313	4.94236	0.891619	164.439	Iron(4,0,0)

Lattice constants

Phase name	a(A)	b(A)	c(A)	alpha(deg)	beta(deg)	gamma(deg)	V(A^3)
Iron	3.5931(9)	3.5931(9)	3.5931(9)	90.000000	90.000000	90.000000	46.387(19)
Iron	2.75654(6)	2.75654(6)	2.75654(6)	90.000000	90.000000	90.000000	20.9455(8)

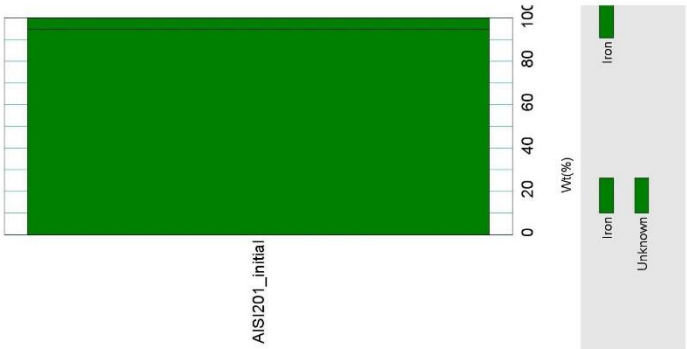
Crystallite size and lattice strain

Williamson-Hall method

Phase name	Crystallite size(A)	Size distribution	Strain(%)	Distribution type
Iron	110(20)	-	0(3)	-
Iron	6474(185)	-	0.0046(7)	-

Quantitative analysis results (RIR)

Phase name	Content(%)
Iron	94.7(7)
Iron	5.3(3)



ДОДАТОК Б

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Видання, які входять до наукометричних баз:

1. Influence a material and the technological factors on improvement of operation properties of machine parts by reliefs and film coatings / E. Posviatenko, N. Posviatenko, R. Budyak, L. Shvets, Ju. Paladiichuk, P. Aksom, I. Rybak, B. Sabadash, V. Hryhoryshen. Eastern–European journal of enterprise technologies. 2018. № 5/12 (95). P. 48–56.

Фахові видання:

2. Посвятенко Е. К. Особливості обробки деталей засобів транспорту із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2015. – Вип. 1 (31). – С. 443 – 449.

3. Посвятенко Е. К. Відновлення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2015. – Вип. 2 (32). – С. 210 – 218.

4. Посвятенко Е. К. Основні напрямки поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2016. – Вип. 1 (34). – С. 370 – 377.

5. Посвятенко Е. К. Розробка наукових основ поліпшення оброблюваності деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Частина 1: Серія: “Технічні науки”. Науковий журнал. – К.: НТУ, 2016. – Випуск 19. – С. 94 – 100.

6. Посвятенко Е. К. Вплив попередньої холодної деформації і рослинних мастильно–охолоджуючих рідин на фізико–механічні та технологічні властивості аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Н. І. Посвятенко

// Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – С. 172 – 178.

7. Посвятенко Е. К., Аксьом П. А. Про природу впливу деформаційного зміцнення на оброблюваність аустенітних сталей. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Наук.–техн. зб. – К.: НТУ, 2019. – Вип. 3 (45). – С. 113 – 121.

Публікації у зарубіжних виданнях:

8. Посвятенко Е. К. Поліпшення властивостей аустенітних сталей як конструкційного матеріалу / Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 6 seria: Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2015, s. 113 – 118.

Патенти:

9. Пат. 118017 Україна, МПК (2017.01) C21D 8/00. Спосіб оброблення аустенітних сталей / Посвятенко Е. К., Аксьом П. А. Власник Національний транспортний університет. – № а 2016 08413; заявл. 01.08.2016; опубл. 25.07.2017. Бюл. № 14.

Публікації апробаційного характеру:

10. Посвятенко Е. К. Підвищення оброблюваності аустенітних сталей різанням / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Ю. В. Драгун // Тези доповідей LXX наукова конференція професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2014. – С. 9 – 10.

11. Посвятенко Е. К. Основний напрямок підвищення оброблюваності аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 14–го Международного научно–технического семинара, 24–28 февраля 2014г., г. Свалява. – Киев: АТМ Украины, 2014. – С. 189 – 192.

12. Посвятенко Е. К. Нова технологія виготовлення та ремонту деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом //

Тези доповідей LXXI наукова конференція професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2015. – С. 9.

13. Посвятенко Е. К. Аустенітні сталі у транспортному машинобудуванні / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // 12–й Міжнародний симпозіум українських інженерів–механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2015. – С. 121 – 122.

14. Посвятенко Е. К. Зміна властивостей аустенітних сталей холодним пластичним деформуванням / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // Тези доповідей III–ої міжнародної інтернет–конференції «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій», 23 грудня 2015 року: збірник наукових праць. Частина 1 / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інші]. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – С. 37.

15. Аксьом П. А. Новий метод обробки аустенітних сталей при виготовленні і відновленні деталей транспортних засобів / П. А. Аксьом // Тези доповідей LXXII наукова конференція професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2016. – С. 9.

16. Посвятенко Е. К. Математична модель обробки деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 16–й Международной научно–практической конференции, 20 – 23 сентября 2016 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2016. – С. 122 – 126.

17. Аксьом П. А. Дослідження холодного пластичного деформування методом поперечного стискання / П. А. Аксьом // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатація машинобудівних конструкцій: Матеріали конференції. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2016. – С. 16 – 17.

18. Посвятенко Е. К. Про вплив дислокацій на фізико–механічні властивості феритних та аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом,

О. В. Мельник // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 17-го Международного научно-технического семинара, 20–24 февраля 2017 г., г. Свалява. – Киев: АТМ Украины, 2017. – С. 239 – 241.

19. Аксьом П. А. Вплив середовища на оброблюваність деталей транспорту із аустенітних сталей / П. А. Аксьом // Тези доповідей LXXIII наукова конференція професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2017. – С. 15.

20. Посвятенко Е. К. Визначення фактичного складу аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом // 13-й Міжнародний симпозіум українських інженерів–механіків у Львові: Матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2017. – С. 187 – 188.

21. Посвятенко Е. К. Про фізичну природу поліпшення оброблюваності аустенітних сталей / Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, П. А. Аксьом // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 17-й Международной научно–практической конференции, 29 мая – 02 июня 2017 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2017. – С. 48 – 53.

22. Аксьом П. А. До аналізу складових металевого матеріалу / П. А. Аксьом, Е. К. Посвятенко, О. В. Мельник // Тези доповідей LXXIV наукова конференція професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2018. – С. 13.

23. Аксьом П. А. Структурні перетворення у аустенітних сталях при холодному пластичному деформуванні / П. А. Аксьом, Е. К. Посвятенко // Тези доповідей LXXV наукова конференція професорсько–викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2019. – С. 9

24. Посвятенко Е. К. Поліпшення оброблюваності різанням пластичних матеріалів / Е. К. Посвятенко, П. А. Аксьом, Р. В. Будяк // 14-й Міжнародний

симпозіум українських інженерів–механіків у Львові: Матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2019. – С. 163 – 164.

ДОДАТОК В



(11) 118017

(19) UA

(51) МПК (2017.01)
C21D 8/00

(21) Номер заявки: а 2016 08413

(22) Дата подання заявки: 01.08.2016

(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: 25.07.2017

(41) Дата публікації відомостей
про заявку та номер
бюлетеня: 10.02.2017,
Бюл. № 3

(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: 25.07.2017,
Бюл. № 14

(72) Винахідники:
Посвятенко Едуард
Карпович, UA,
Аксьом Петро Андрійович,
UA

(73) Власник:
НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТРАНСПОРТНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Суворова, 1, м. Київ-10,
01010, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ОБРОБЛЕННЯ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб оброблення аустенітних сталей, в якому отримання потрібних геометричних розмірів досягається шляхом зняття/видалення певного шару оброблюваного матеріалу, використовуючи вищезгадані способи в поєднанні з мастильно-охолоджуючими рідинами, який відрізняється тим, що оброблювану поверхню деталі засобів транспорту із аустенітних сталей попередньо піддають холодній пластичній деформації за одним з відомих методів холодної пластичної деформації, потім за допомогою різання та мастильно-охолоджуючих речовин, знімають потрібний шар матеріалу та відновлюють початкові властивості матеріалу шляхом термообробки.

(11) 118017

Державне підприємство
«Український інститут інтелектуальної власності»
(Укрпатент)

Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.

Ідентифікатор електронного документа 2378010817.

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці <http://base.uipv.org/searchInvStat/>.

2. Виконати пошук за номером заявки.

3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа.

Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Уповноважена особа Укрпатенту



І.Є. Матусевич

25.07.2017



МІНІСТЕРСТВО
ЕКОНОМІЧНОГО
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **118017** (13) **U**
(51) МПК (2017.01)
C21D 8/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **а 2016 08413**
(22) Дата подання заявки: **01.08.2016**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.07.2017**
(41) Публікація відомостей про заяву: **10.02.2017, Бюл.№ 3**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.07.2017, Бюл.№ 14**

(72) Винахідник(и):
**Посвятенко Едуард Карлович (UA),
Аксьом Петро Андрійович (UA)**
(73) Власник(и):
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Суворова, 1, м. Київ-10, 01010 (UA)**
(74) Представник:
Краснокутська Зоя Ігорівна

(54) СПОСІБ ОБРОБЛЕННЯ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ

(57) Реферат:

Спосіб оброблення аустенітних сталей, в якому отримання потрібних геометричних розмірів досягається шляхом зняття/видалення певного шару оброблюваного матеріалу, використовуючи вищезгадані способи в поєднанні з мастильно-охолоджуючими рідинами. Оброблювану поверхню деталей засобів транспорту із аустенітних сталей попередньо піддають холодній пластичній деформації за одним з відомих методів холодної пластичної деформації, потім за допомогою різання та мастильно-охолоджуючих речовин, знімають потрібний шар матеріалу та відновлюють початкові властивості матеріалу шляхом термообробки.

UA 118017 U

Спосіб належить до оброблення металів, а саме до оброблення різанням з попередньою деформацією та термообробкою.

Відомі такі способи оброблення сталей як: різання, точіння, свердління, фрезерування, шліфування, полірування, протягування, стругання, обробка тиском, абразивне оброблювання, хонінгування. Недоліками цих способів є низька продуктивність, токсичність процесу та велика вартість отримання кінцевого продукту. При застосуванні вищезгаданих способів, сталі оброблюються за допомогою різальних інструментів, абразивних частинок, стиснутого повітря або водяного струменя за допомогою мастильно-охолоджуючих речовин (МОР). Продуктивність даних способів залежить від режимів різання, тиску, величини абразивних частинок та вибору МОР. Бажані результати досягаються шляхом поєднання наведених способів та допоміжних речовин [1,2,3].

Найбільш близьким за технічною суттю та сукупністю ознак, до корисної моделі, яка заявляється є: отримання потрібних геометричних розмірів шляхом зняття/видалення певного шару оброблюваного матеріалу, використовуючи вищезгадані способи в поєднанні з мастильно-охолоджуючими рідинами [1,2,3].

Недоліками наведених способів при обробці деталей засобів транспорту із аустенітних сталей є мала продуктивність, токсичність та велика вартість.

Задача корисної моделі - підвищення оброблюваності деталей засобів транспорту із аустенітних сталей.

Поставлена задача вирішується шляхом поєднання двох способів. А саме холодного-пластичного деформування (ХПД) та різання. Оброблювану поверхню деталі засобів транспорту із аустенітних сталей попередньо піддають холодній пластичній деформації за одним з відомих методів холодної пластичної деформації, потім за допомогою різання та мастильно-охолоджуючих речовин, знімають потрібний шар матеріалу та відновлюють початкові властивості матеріалу шляхом термообробки.

На кресленні зображується спосіб оброблення аустенітних сталей, який реалізовується послідовним виконанням декількох процесів, а саме, спочатку оброблювану поверхню деталі піддають холодному-пластичному деформуванню, одним з існуючих методів. Потім поверхню оброблюваної деталі, в зоні застосування холодної-пластичної деформації, оброблюють різанням за однією з існуючих схем різання. Завершальною дією в цьому способі є термообробка, яка повертає поверхні оброблюваної деталі всі початкові фізико-механічні властивості.

Застосовуючи дану послідовність оброблення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей можна досягнути підвищення продуктивності та екологічності процесу, а також зменшення витрат.

Джерела інформації:

1. Грановский Г. И. Резание Металлов / Г. И. Грановский, П. П. Трудов. - Москва: Машгиз, 1954. - 472 с.
2. Кириллов П. Г. Теория обработки металлов давлением / Петр Георгиевич Кириллов. - Москва: Высшая школа, 1965. - 296 с.
3. Армарего И. А. Обработка металлов резанием / И. А. Армарего, Р. Х. Браун. - Москва: Машиностроение, 1977. - 326 с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб оброблення аустенітних сталей, в якому отримання потрібних геометричних розмірів досягається шляхом зняття/видалення певного шару оброблюваного матеріалу, використовуючи вищезгадані способи в поєднанні з мастильно-охолоджуючими рідинами, який відрізняється тим, що оброблювану поверхню деталі засобів транспорту із аустенітних сталей попередньо піддають холодній пластичній деформації за одним з відомих методів холодної пластичної деформації, потім за допомогою різання та мастильно-охолоджуючих речовин, знімають потрібний шар матеріалу та відновлюють початкові властивості матеріалу шляхом термообробки.



UA 118017 U

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ДОДАТОК Г

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з навчальних дисциплін:

«ТЕХНОЛОГІЯ МЕТАЛІВ І МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

ТА

«ОСНОВИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ»

для студентів першого (бакалаврського) освітнього рівня
зі спеціальностей:

- 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування»,
142 «Енергетичне машинобудування»,
274 «Автомобільний транспорт», 132 «Матеріалознавство»,
152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка», 022 «Дизайн»,
015 «Професійна освіта»
(денна форма навчання)

Затверджено
на засіданні навчально-методичної Ради
Національного транспортного університету
протокол № 11 від 16 листопада 2017 р.

КНІВ НТУ 2018

Технології металів і матеріалознавство та Основи обробки металів
 Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів першого
 (бакалаврського) освітнього рівня зі спеціальностей: 131 «Прикладна
 механіка», 133 «Газове машинобудування», 142 «Енергетичне машино-
 будування», 274 «Автомобільний транспорт», 132 «Матеріалознавство», 152
 «Металургія та інформаційно-вимірвальна техніка», 022 «Дизайн», 015
 «Професійна освіта» / Укл. Посвятенко Е.К., Аксьом П.А., Мельник О.В.,
 — К.: НТУ, 2018. — 120 с.

Методичні вказівки складено з метою найбільш повного забезпечення самостійної та
 аудиторної роботи студентів при вивченні дисциплін «Технологія металів і
 матеріалознавство» та «Основи обробки металів».
 Тематика лабораторних робіт відповідають навчальній програмі дисциплін «Технологія
 металів і матеріалознавство» та «Основи обробки металів».

Зміст

Тематика лабораторних робіт:	
Лабораторна робота №1 Мікроскопічний метод дослідження структури металів та сплавів	4
Лабораторна робота №2 Визначення твердості металів	13
Лабораторна робота №3 Дослідження мікроструктури і твердості вуглецевих сталей	19
Лабораторна робота №4 Вивчення мікроструктури та властивостей чавунів	25
Лабораторна робота №5 Вплив швидкості охолодження на структуру і властивості вуглецевих сталей	30
Лабораторна робота №6 Відпускання загартованої вуглецевої сталі	37
Лабораторна робота №7 Класифікація, маркування легированих сталей і спеціальних сплавів	39
Лабораторна робота №8 Структура, склад і властивості пластмас	43
Лабораторна робота №9 Переробка пластмас у вироби	48
Лабораторна робота №10 Вивчення конструкції токарно-гвинторізального верстату	56
Лабораторна робота №11 Вивчення конструкції та геометрії багатолезових різальних інструментів	61
Лабораторна робота №12 Вивчення геометричних параметрів токарного різця	68
Лабораторна робота №13 Робота з дільногою головкою і настрівання універсально-фрезерного верстату на нарізання зубчастого колеса з гвинтовим зубом	72
Лабораторна робота №14 Дослідження впливу елементів режиму різання на шорсткість обробленої поверхні при точінні	77
Лабораторна робота №15 Визначення усадки стружки	83
Лабораторна робота №16 Дослідження впливу елементів режиму різання на силу різання при точінні	87
Лабораторна робота №17 Дослідження впливу елементів режиму різання на температуру різання	91
Лабораторна робота №18 Загочування і доводка різальних інструментів	95
Список рекомендованої літератури	107
Додаток А	109
Додаток Б	115
Додаток В	117

Підписано до друку 12.01.2018 р. Формат 60х84/16.
Папір офсетний № 1. Гарнітура Times.
Вк. 17. Наклад 50. Зам. Л_18_0014.

01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 39.
Редакційно-видавничий відділ НТУ, тел.: 284-26-26

ДОДАТОК Д

УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

КОД 02071180
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2
тел. 707-53-65

" 21 " 06 2019 р.
№ 66-02-151/34

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційних досліджень здобувача
АКСЬОМА ПЕТРА АНДРІЙОВИЧА

Аксьом П. А. приймав участь у виконанні наступних науково-дослідницьких та науково-технічних робіт за тематичним планом Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»):

1. Прикладна держбюджетна робота М1208 «Плутон» (2016–2017 рр.) (№ д.р. 0116U000020т);
2. Договір про співробітництво із ДП «Завод ім. В. О. Малишева», м. Харків;
3. Договір про співробітництво із ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О. О. Морозова», м. Харків;
4. Договір про співробітництво із ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування», м. Харків.

За цими темами та договорами були виконані роботи із поліпшення властивостей відновлюваних деталей засобів транспорту.

Результатами досліджень за кандидатською дисертацією Аксьома П. А. впроваджені за переліченими роботами, що дало можливість досягнути економічного ефекту у дольовому розмірі, який складає 62,0 тис. грн. Розмір ефекту визначено згідно актів впровадження з урахуванням особистого вкладу здобувача Аксьома П. А.

Проректор НТУ «ХПІ»

Науковий керівник, відповідальний
виконавець виконаних робіт

Відповідальний виконавець договорів



А. П. Марченко

М. А. Ткачук

А. В. Грабовський

ДОДАТОК Е

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
ТДВ «Мукачівський
машинобудівний завод»
В.Р. Фомін
«03» січня 2018 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Аксьома П.А.
«Підвищення оброблюваності деталей засобів транспорту із аустенітних сталей» в виробничому процесі виготовлення спеціалізованих конструкцій автомобілів зі сталі 08X18N10 на ТДВ «Мукачівський машинобудівний завод».

Закарпатська обл., Мукачівський р-н., смт. Кольчино січень 2018 р.

Ми, що нижче підписалися, від ТДВ «Мукачівський машинобудівний завод» начальник технічного відділу Моргун І.М., та від Національного транспортного університету, проф. Посвятенко Е.К., аспірант Аксьом П.А., склали цей акт на предмет використання результатів роботи Аксьома П.А. «Підвищення оброблюваності деталей засобів транспорту із аустенітних сталей» у виробничому процесі ТДВ «Мукачівський машинобудівний завод».

В дисертаційній роботі Аксьома П.А. розроблено спосіб оброблення аустенітних сталей, що полягає в послідовному поєднанні холодного пластичного деформування та різання в середовищі екологічно чистих мастильно-охолоджуючих рідин з наступною термообробкою деталей. Цей спосіб дозволяє підвищити оброблюваність деталей засобів транспорту із аустенітних сталей за рахунок виконання частини роботи різання в процесі попереднього холодного пластичного деформування.

Розроблений спосіб дозволяє оброблювати деталі із аустенітних сталей з використанням різців із швидкорізальної сталі Р6М5 та Р18, застосовуючи при різанні екологічно чисті мастильно-охолоджуючі рідини рослинного походження, наприклад, ріпакову олію.

Для відновлення фізико-механічних властивостей спеціалізованих конструкцій автомобілів зі сталі 08X18N10, після виготовлення за вищеописаним способом, деталі піддають термообробці, а саме, високотемпературному відпуску.

Використання даного способу при виробництві спеціалізованих конструкцій автомобілів дозволяє скоротити витрати на різальний інструмент та підвищити екологічність процесу.

Від Національного транспортного університету

Е.К. Посвятенко

П.А. Аксьом

Від ТДВ «Мукачівський машинобудівний завод»
І.М. Моргун