

ним житлом з невеликою площею, але, за рахунок технологічності і мобільності, надають можливість трансформувати квартиру і поєднувати функціональні призначення кімнат в залежності від уподобань людини.

Висновки. Вітчизняний досвід проектування житлових будинків соціально фонду значно відрізняється від закордонного. Зарубіжні прийоми і технології в проектуванні і будівництві соціального житла досить різноманітні, спрямовані одночасно на об'єднання мешканців в одне ціле при спільному дозвіллі зі збереженням індивідуальності. В цілому зарубіжний досвід зведення соціального житла може бути адаптований до умов м.Кривого Рогу для зняття гостроти житлової проблеми, поліпшення якості міського середовища, поліпшення менеджменту соціального житла та розвитку широкої житлової демократії та управління соціальним житлом.

Список літератури

1. **Непомнящий О.М.** Поштовх до будівництва доступного житла та механізми його реалізації в Україні / О.М. Непомнящий // Будівництво України. – 2011. - № 3. – С.16-21.
2. **Гайворонский Е. А.** Региональные особенности архитектуры и градостроительства Донбасса в научных исследованиях, в проектной практике, творчестве и подготовке специалистов на архитектурном факультете Донбасской национальной академии строительства и архитектуры / Е. А. Гайворонский // Сучасне промислове та цивільне будівництво. - 2016. - Т. 12, № 1. - С. 31-50. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN//spcb_2016_12_1_6.
3. Социальное жилье за границей: шведские "хрущевки" и гонконгские "гостинки" в небоскребе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.segodnya.ua/economics/realty/socialnoe-zhile-za-granicey-shvedskie-hrushchevki-i-gonkongskie-gostinki-v-neboskrebe-1137220.html> (Дата обращения: 20.09.2019)
4. Доступно ли жилье за рубежом? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vseon.com/analitika/sovremennaya-strojka/dostupno-li-zhile-za-rubezhom> (Дата обращения: 20.09.2019).
5. **Радионон Т.В.** Рекомендации по реконструкции объектов типовой застройки /Т.В. Радионон // Містобудування та територіальне планування. К.: КНУБА, 2013,- Вип. 49. - С. 446-451.
6. Сравним ли жилье у нас и за рубежом [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.investa24.com>. (Дата обращения: 20.09.2019).
7. Cohousing Association of the US (CohoUS) [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.cohousing.org. (Дата обращения: 20.09.2019).
8. **Маликов Н.** Как выглядят дворы социального жилья в Европе. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gre4ark.livejournal.com/424782.html>. (Дата обращения: 8.10.2019).
9. **Орна Розенфельд.** Социальное жилье в регионе ЕЭК ООН : модели, тенденции и вызовы. Доклад в ООН. Нью-Йорк и Женева, 2018.- С.1-127.

Рукопис подано до редакції 04.11.2019

УДК 621.9.04:533.9: 621.791.947.55

В.П. НЕЧАЄВ, А.О. РЯЗАНЦЕВ, кандидати техн. наук, доценти, О.В. ЧЕРНЯВСЬКА, Л.І. ЛАУХІНА, ст. викладачі, Д.О. ЛАВРИНЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОВО-МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ

Мета. Метою даної роботи є вдосконалення технології обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів, а саме – дослідження й наукове обґрунтування параметрів процесу плазмово- механічної обробки поверхонь деталей з легованих сталей для підвищення продуктивності обробки, забезпечення необхідної якості поверхневих шарів обробленої деталі.

Методи дослідження. Результати роботи з плазмово-механічної обробки отримані шляхом теоретичних і експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження полягають у визначенні параметрів теплового поля заготовки при плазмовому нагріванні в умовах плазмово-механічного точіння й фрезерування. Експериментальні дослідження засновані на комплексному вивченні взаємозв'язку основних показників механічної обробки з факторами попереднього плазмового нагрівання припуску.

Наукова новизна. У результаті проведених досліджень були отримані дані про стан параметрів якості обробленої поверхні заготовки при нагріванні плазмовою дугою. Виявлена залежність виду мікроструктури від глибини поверхневого шару заготовки, установлений розподіл залишкових напружень по глибині поверхневого шару. Вивчені

особливості схем розташування зон зі зміненою мікроструктурою і їх взаємозв'язок з режимами нагрівання й різання в конкретних умовах плазмово-механічної обробки.

Практичне значення. Розроблений процес плазмово-механічного точіння, фрезерування та рекомендації з вибору параметрів нагрівання та різання дозволяють збільшити продуктивність обробки заготовок із середньо легованих сталей при забезпеченні заданих параметрів якості обробленої поверхні.

Результати. Встановлено, що попереднє плазмове нагрівання при механічній обробці забезпечує протікання специфічного термічного циклу в матеріалі припуску, у результаті чого змінюються твердість і пластичність оброблюваного матеріалу. Зміна механічних властивостей припуску приводить до зниження питомих навантажень на ріжучий клин, до зниження інтенсивності його адгезійного зношування й тендітного руйнування, до стабілізації його округлення, що позитивно позначається в цілому на висоті мікронерівностей і ступені наклепу обробленої поверхні.

Ключові слова: плазмова дуга, мікроструктура, залишкові напруги, мікротвердість, шорсткість поверхні.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-105-113

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Розвиток машинобудування вимагає від вчених і інженерів пошуку нових високоефективних методів обробки конструкційних матеріалів, створення надійних технологічних процесів і найбільш ефективного застосування їх в виробничих умовах.

Міцність, в'язкість і інші характеристики сучасних конструкційних матеріалів зростають настільки швидко, що інструментальні матеріали, які використовує виробництво, у цілому ряді випадків не дозволяють здійснювати високопродуктивну обробку заготовок. До того ж різання часто доводиться вести в екстремальних умовах – по кірці, по високоміцних наплавленнях, при більших перетинах зрізу, що збільшує технологічні труднощі. У зв'язку із цими особливостями сучасного виробництва в металообробці, поряд з іншими методами інтенсифікації технологічних операцій, розвивається напрямок по підвищенню ефективності процесу різання шляхом тимчасового зниження міцності оброблюваного матеріалу й зміни механізмів контактних процесів, що протікають на робочих поверхнях інструмента [6-9, 15, 18-20].

Одним з таких процесів є плазмово-механічна обробка (ПМО). З'явившись в середині минулого століття, вона до цих пір є предметом вивчення, в наукових лабораторіях, розкриваються її нові можливості та перспективи. ПМО - досить складний процес, кількість керованих параметрів якого велике, що ускладнює ефективно застосовувати процес без попередніх досліджень для визначення раціональних режимів обробки [1-5]. Він являє собою комбінований процес, при якому механічна енергія та енергія низькотемпературної плазми сумісно використовується для підвищення ефективності процесу різання при виготовленні деталей машин із сучасних важкооброблюваних матеріалів [10-14, 18-20].

Оскільки термічний цикл поверхневих шарів заготовки при плазмовому нагріванні, внаслідок структурно-фазових перетворень, істотно змінює їх фізико-механічні властивості в сторону зменшення, з'являється можливість значно підвищити продуктивність обробки, забезпечуючи при цьому необхідну стійкість різального інструмента [14, 15].

Висока ефективність ПМО робить актуальними подальші розробки, спрямовані на пошук нових способів застосування плазмової дуги для поверхневого нагрівання, знеміцнення припуску, що дозволило б значно підвищити продуктивність обробки важкооброблюваних матеріалів, за умовою забезпечення якості поверхневих шарів оброблюваних деталей [8-11].

Аналіз досліджень і публікацій. Якість обробленої поверхні визначається шорсткістю поверхні й станом матеріалу поверхневого шару. Шорсткість обробленої поверхні характеризується висотою й формою мікронерівностей. Стан матеріалу поверхневого шару характеризується його зміцненням (наклепом), мікроструктурою, величиною й знаком залишкових напруг і глибиною їх залягання [16, 19]. Аналіз літературних даних по токарній обробці й фрезеруванню дозволив виділити конкретні фактори, які впливають на зміну дійсної висоти мікронерівностей, мікроструктуру й залишкові напруги в поверхневому шарі деталі [18-20].

На рис. 1 зображений розрахунковий мікропрофіль обробленої поверхні при точінні (а) і фрезеруванні циліндричними фрезами (б). Для простоти взятий різець без перехідного леза.

При точінні висота розрахункових нерівностей R_{zp} дорівнює висоті pc трикутника mnp

$$R_{zp} = mn \cdot \sin \varphi_1; \quad (1)$$

$$R_{zp} = \frac{S \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)} \quad (2)$$

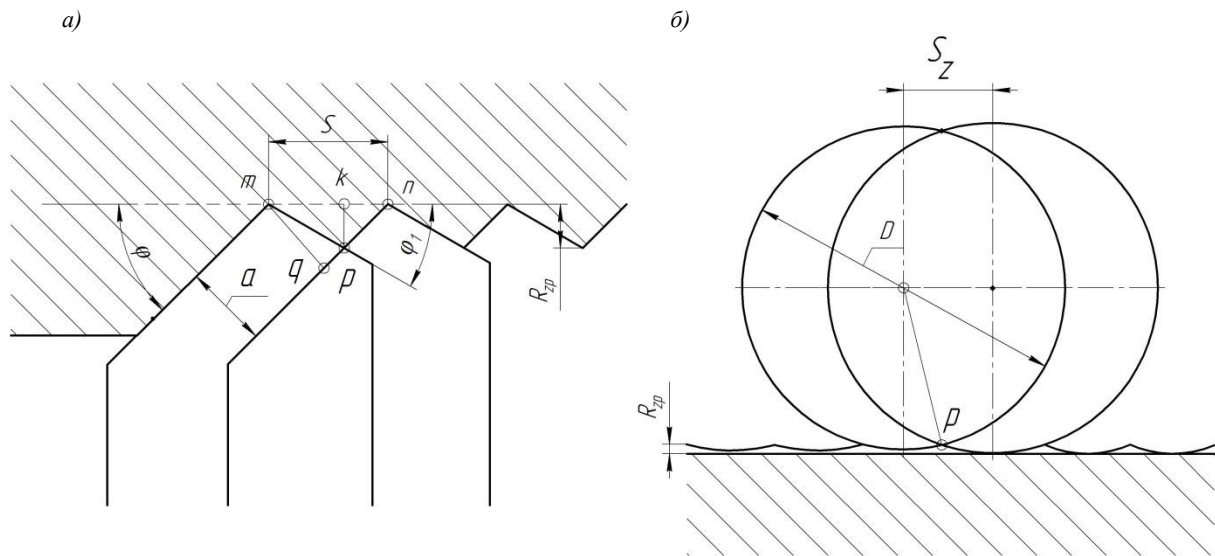


Рис.1. Теоретичний мікропрофіль оброблюваної поверхні при точінні (а) і фрезеруванні циліндричними фрезами (б)

Формула придатна для розрахунків R_{zp} при розточуванні, свердлінні, зенкеруванні, струганні й фрезеруванні торцевими фрезами. При фрезеруванні висота розрахункових нерівностей визначається положенням точки д перетинання двох окружностей, що відстоять друг від друга на відстані, рівному подачі S_z на зуб фрези

$$R_{zp} \approx \frac{S_z^2}{4D} \quad (3)$$

Розрахункові нерівності при точінні зменшуються при зменшенні подачі, кутів у плані й збільшенні радіуса перехідного леза. Якщо на різці зробити допоміжний кут у плані рівним нулю, а довжину допоміжного леза на 20-30% більше подачі на оборот, то розрахункові нерівності утворюватися не будуть [16].

Крім цих факторів на висоту нерівностей впливають усі ті, які змінюють обсяг пластичного деформування матеріалу й умови тертя на контактних поверхнях інструмента. До них можна віднести механічні властивості оброблюваного матеріалу, швидкість різання й властивості застосовуваної мастильно-охолоджувальної рідини.

З підвищенням твердості й міцності оброблюваного матеріалу й зниженням його пластичності обсяг пластичної деформації зменшується, і це приводить до зменшення висоти нерівностей.

Залишкові напруги, що виникають у поверхневому шарі, і його наклеп є наслідком силового поля, створюваного силами різання, нагрівання матеріалу оброблюваної деталі й структурних перетворень. При різанні металевим інструментом (точінні, фрезеруванні, свердлінні) залишкові напруги утворюються головним чином під дією силового поля. Температура має другорядне значення. При обробці тендітних матеріалів залишкові напруги стискаючі, а при обробці пластичних металів найчастіше розтягуючі. При високотемпературному режимі (шліфуванні) залишкові напруги утворюються внаслідок високої температури поверхневого шару і є завжди розтягуючими.

На рис. 2 представлена епора зміни залишкових напруг залежно від відстані Δ від обробленої поверхні при обробці більшості пластичних матеріалів. У дуже тонкому шарі товщиною 0,001-0,004 мм (зона I) діють стискаючі напруги. У зоні II, довжина якої залежить від режиму різання й переднього угла інструмента, діють розтягуючі напруги. Довжина зони II в 10 раз і більш перевершує довжина зони I, і тому стан поверхневого шару визначають характер і величина напруг у зоні II. У зоні III, що врівноважує дія залишкових напруг перших двох зон, напруги стискаюча. Наявність у поверхневому шарі розтягуючих напруг значно погіршує його

якість, тому що при цьому знижується втомна міцність, а якщо залишкові напруги по величині перевершують межа міцності матеріалу оброблюваної деталі, то це може привести до утвору поверхневих тріщин.

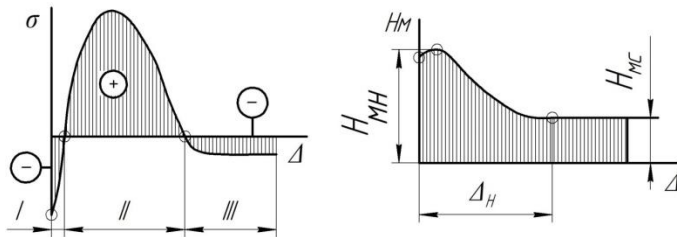


Рис.2. Епюра зміни залишкових напруг в залежності від відстані Δ від оброблюваної поверхні

Величина й глибина залягання залишкових напруг залежать від переднього кута інструмента, подачі (товщини шару, що зрізується), швидкості різання, ступені зношування інструмента.

нта.

Під ступенем наклепу ΔH_M поверхневого шару розуміють відношення різниці найбільшої мікротвердості $H_{ми}$ наклепаного шару й мікротвердості $H_{мс}$ ненаклепаного матеріалу до $H_{мс}$

$$\Delta H_M = [(H_{ми} - H_{мс}) / H_{мс}] 100\%. \quad (4)$$

Наклеп поверхневого шару зв'язаний в основному з деформацією й зміцненням ферритної фази оброблюваного матеріалу. Ступінь наклепу й товщина Δh наклепаного шару перебувають у прямої залежності від ступеня деформації зрізаного шару і діють сил різання.

Постановка задачі. Оскільки в спеціальній літературі практично відсутня структурована інформація про особливості змін параметрів якості поверхневих шарів деталі при ПМО, прийнято за доцільне доповнити відсутню інформацію по даному напрямку. Таким чином, метою даної роботи є вдосконалення технології обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів, а саме – дослідження й наукове обґрунтування параметрів процесу плазово-механічної обробки поверхонь деталей з легованих сталей для підвищення продуктивності обробки, забезпечення необхідної якості поверхневих шарів обробленої деталі.

Сформульована мета роботи обумовила необхідність дослідження особливостей контактних процесів в зоні різання, в тому числі – впливу параметрів ріжучої частини інструменту та режимів ПМО на шорсткість, залишкові напруження й мікроструктуру поверхневих шарів деталі.

Виклад матеріалу і результати. Далі розглянемо отримані дані по впливу параметрів ПМО на мікроструктуру й наклеп поверхневих шарів деталі, а також їх шорсткість і залишкові напруги.

Нагрівання заготовки плазовою дугою спричиняє чотири основні явища: зниження міцності оброблюваного металу; виникнення системи структурних перетворень і термічних напруг у поверхневих шарах заготовки; розплавлення частини металу, що підлягає зрізу, і зміна параметрів тертя на поверхнях контакту нагрітих металів заготовки й різального інструменту. [11, 17].

Мікроструктура й наклеп поверхневих шарів металу. Основною особливістю плазового нагрівання є його локальність, що сполучається з високою потужністю теплового джерела. У заготовці відбуваються теплові процеси, що відрізняються високими швидкостями нагрівання й охолодження, значними градієнтами температур, а самі температури на поверхні нагрівання можуть досягати температур плавлення (і навіть випару) оброблюваного матеріалу. У таких умовах у поверхневих шарах заготовки відбуваються структурні зміни й розбудовуються термічні напруги, створюється дефектний шар.

У дефектному шарі можуть виникати тріщини, зміни хімічного складу металу, а також несприятливий розподіл залишкових напруг. Найнебезпечнішим дефектом обробленої поверхні при ПМО є тріщини, які можуть досягати значної глибини, викликаючи необхідність збільшення припуску на наступну обробку заготовок і знижуючи міцність деталі в цілому. Тріщини можуть виникати найчастіше при обробці тендітних металів, таких, наприклад, як сталь 110Г13Л, чавун або високоміцні наплавлення.

У процесі затвердіння й наступного охолодження ділянок заготовки, що розплавлялись під дією плазової дуги, утворюється кілька зон структурно-зміненого, попередньо-напруженого металу (рис. 3). До поверхні нагрівання прилягає зона дезорієнтованих дендритів 2, у якій виникають глибокі тріщини. Під цією зоною розташовується шар 3 зі стовпчастими дендритами, а далі - область 1, у якій виникають мікротріщини.

Рис.3. Схема розташування зон зі зміненою мікроструктурою при ПМО

Металографічні дослідження шарів, що прилягають до обробленої поверхні металу, показують, що при раціональних режимах різання й нагрівання процес ПМО сталей (у тому числі й термооброблених) не тільки суттєво підвищує продуктивність операцій, але й дозволяє, як правило, одержати задану якість поверхневого шару деталей.

При високотемпературному підігріві жароміцних сплавів, як показали дослідження [6], можлива поява приповерхнього шару зі зміненою дрібнозернистою структурою глибиною 0,2...0,6 мм, що, однак, не знижує якості обробленої поверхні.

Більш складно обробляються при плазмовому нагріванні заготовки з легованих високоміцних і жаростійких чавунів, що мають низьку теплопровідність і високу крихкість. Дослідження показали [8, 10], що високопродуктивна ПМО відпалених хромистих і жаростійкого чавунів цілком здійсненна, якщо плазмове нагрівання проводити більш рівномірно й не настільки інтенсивно, як при обробці заготовок зі сталей.

Хімічний склад поверхневих шарів заготовок зі сталей 110Г13Л, 30Х2Н2М и 18Х2Н4МА, як показали дослідження виконані за допомогою мікροаналізатору «Сameбах МВ-1» залишається без змін [6, 17].

Пластичне деформування в процесі ПМО підвищує, як і при звичайному різанні, твердість металу поверхневих шарів деталі в порівнянні з вихідною твердістю матеріалу заготовки. Особливістю процесу ПМО (рис.4) є те, що зі збільшенням потужності дуги мікротвердість зростає. Це пояснюється загартуванням обробленої поверхні відбитим потоком розпечених газів, що виходять із області плями нагрівання.

H , МПа

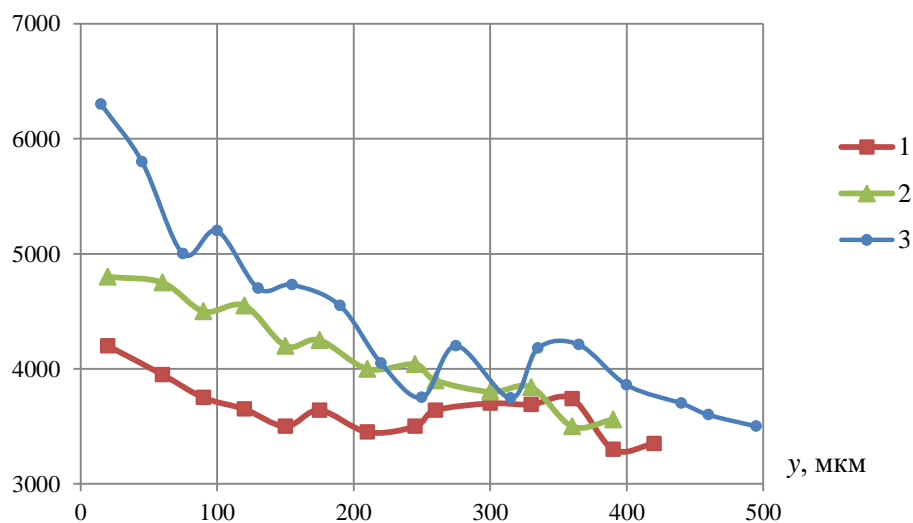


Рис. 4. Залежність мікротвердості H від глибини поверхневого шару заготовок зі сталі 25ХН3МФА ($t = 18$ мм; $S = 2,5$ мм/об; $V = 15$ м/мин): 1 – точіння без нагрівання; 2 – ПМО ($I=250$ А; $U=180$ В); 3 – ПМО ($I=400$ А; $U=180$ В)

Шорсткість поверхні й залишкові напруги. Дослідження, виконані в СПБТУ [6, 17], показали, що при чорновому та напівчистовому точінні із плазмовим нагріванням шорсткість обробленої поверхні практично не відрізняється від шорсткості, отриманої при тому ж режимі різання без підігріву заготовки плазмовою дугою. Залишкові напруги в шарі, що прилягає до обробленої поверхні, формуються при ПМО як результат температурних і механічних деформацій, що відбуваються в металі під дією термічного циклу й процесу різання.

Для визначення дотичних залишкових напруг у поверхневих шарах заготовок після ПМО з використанням методики Н.Н. Давиденкова [6]. Аналіз експериментальних даних (рис. 5, 6) свідчить про складний характер впливу плазмового нагрівання заготовок на залишкові напруги. Найбільше суттєво це проявляється при швидкостях різання нижче 30 м/хв, коли плазмове нагрівання приводить до появи залишкових напруг стиску. Величина цих напруг залежить від питомої енергії теплового джерела й перетину зрізу. При $t \cdot s = 5 \cdot 1$ мм² и 15·2 мм², коли відпові-

дно $q_{уд} \geq 10$ и $q_{уд} \geq 100$ кДж/м, залишкові напруги стискання $\sigma_z = - (200...600)$ МПа розповсюджуються на глибину 0,05...0,1 мм, перетворюючись далі в балансувальні напруження розтягування. При більш значних швидкостях ПМО заготовок із сталей 40ХН и 15Х2НМФА виникають розтягувальні поверхневі залишкові напруження $\sigma_z = 20...600$ МПа. На глибині 0,1...0,4 мм від поверхні ці напруги переходять у стискаючі. Зі зменшенням перетину зрізу ймовірність появи напруг стиску на обробленій поверхні заготовки підвищується.

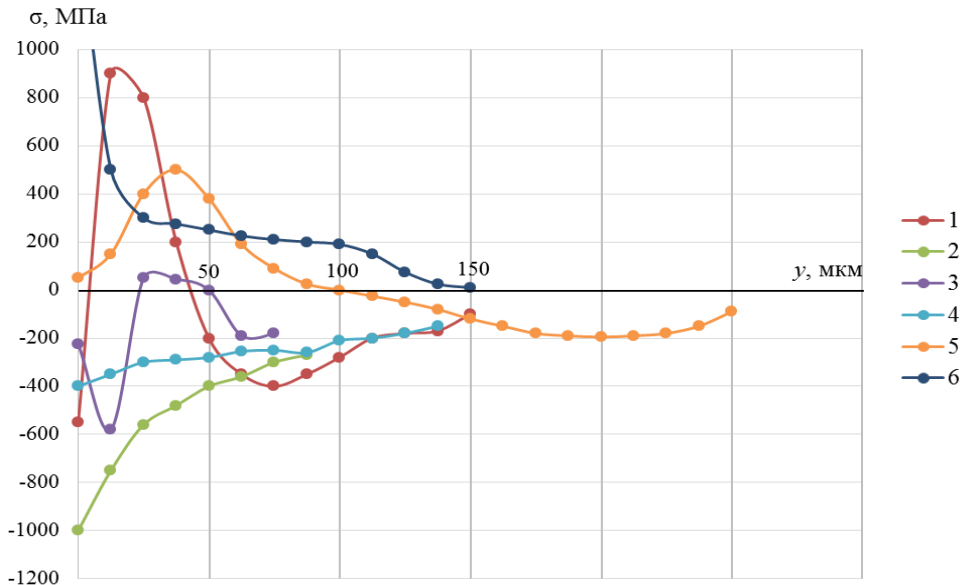


Рис. 5. Розподіл залишкових напруг по глибині поверхнього шару (матеріал різця – Т5К10) [17]: 1 – точіння без нагрівання, матеріал заготовки – сталь 38ХН3МФА ($t = 4$ мм; $S = 0,43$ мм/об; $V = 29$ м/хв); 2 – те ж саме, але з нагріванням ($I = 175$ А; $U = 120$ В); 3 – точіння заготовок зі сталі 38ХН3МФА ($t = 2$ мм; $S = 0,195$ мм/об; $V = 68$ м/хв; $I = 100$ А; $U = 120$ В); 4 – стругання заготовок зі сталі 110Г13Л ($t = 6$ мм, $S = 1,4$ мм/подв. хід; $V = 14$ м/хв; $I = 200$ А; $U = 100$ В); 5 – точіння заготовок із сталі 40ХН ($t = 3$ мм; $S = 0,4$ мм/об; $V = 140$ м/хв; $I = 110$ А; $U = 125$ В); 6 – точіння заготовок зі сталі 15ХН2МФА ($t = 5$ мм; $S = 1,6$ мм/об; $V = 100$ м/хв; $I = 230$ А; $U = 130$ В)

Розтягувальні напруги на крайках листів, призначених для зварювання, бажані, тому що вони зменшують величину зварювальних напруг. При торцевому фрезеруванні із плазмовим нагріванням, так само як і при обробці заготовок без нагрівання, залишкові напруги виявляються стискаючими (рис.7) [6, 17]. Зменшення величини останніх у зоні врізання зубів фрези зв'язане, очевидно, із впливом розтягувальних напруг, що виникають під дією термічного циклу підігріву.

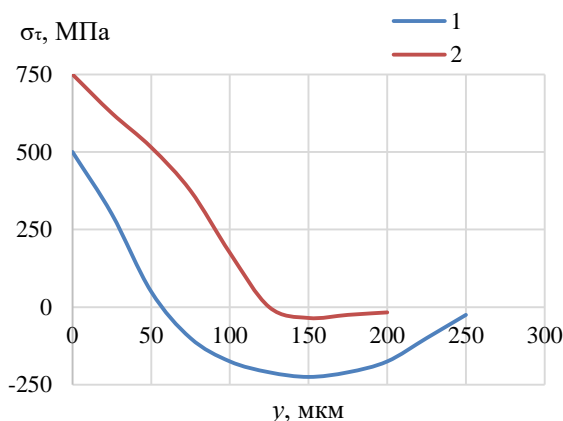


Рис. 6. Розподіл залишкових напруг в поверхневих шарах листових заготовок після фрезерування, з плазмовим нагріванням кромки заготовки циліндричною фрезою ($t = 5$ мм; $V = 200$ м/хв; $I = 200$ А; $U = 140$ В): 1 – заготовка із сталі 14Х2Н3МА ($S_z = 0,3$ мм/зуб); 2 – заготовка із сталі 45Г17ЮЗ ($S_z = 0,2$ мм/зуб)

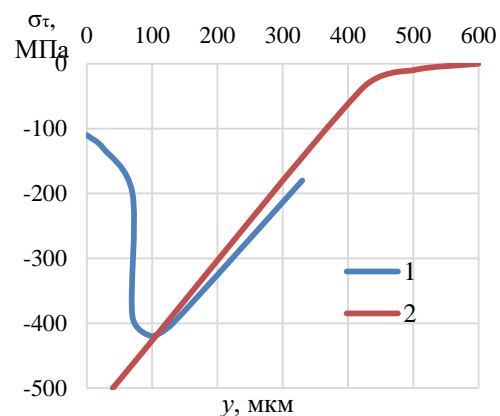


Рис. 7. Розподіл залишкових напруг в поверхневих шарах заготовок зі сталі 38ХН3МФА після фрезерування з плазмовим нагріванням торцевою фрезою ($t = 5$ мм; $S_z = 0,17$ мм/зуб; $V = 237$ м/хв; $I = 170$ А; $U = 140$ В): 1 – в зразку, отриманому на відстані 60 мм від краю заготовки; 2 – в зразку шириною 10 мм із краю заготовки

Оскільки ПМО в сучасних технологічних процесах застосовується на чорнових операціях, а подальша обробка заготовок здійснюється звичайними методами (без плазмового нагрівання), важливо з'ясувати, яка технологічна спадковість при ПМО залишкових напруг, що виникають після чистової обробки. Становлять інтерес дослідження, у яких проводили виміру напруг у приповерхніх шарах матеріалу валів діаметром 550 мм і довжиною 1000 мм зі сталі 25ХНЗМФА. Спочатку вивчалися напруги після точіння із плазмовим нагріванням, а потім після чистової обробки [17]. Результати вимірів, представлені на рис. 8, показують, що режими ПМО впливають на величину й на розподіл залишкових напруг у поверхневих шарах металу.

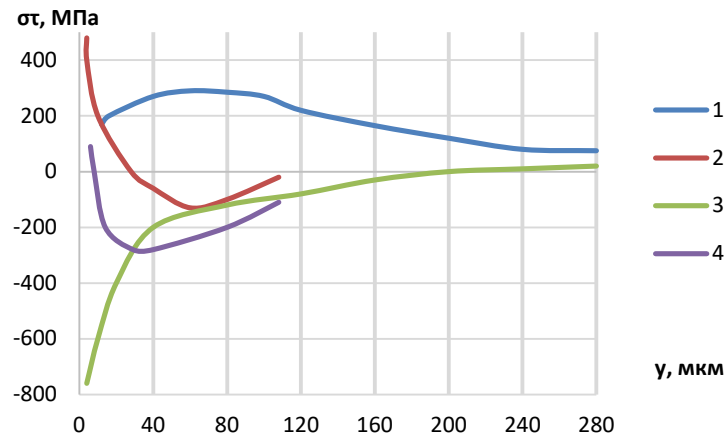


Рис.8. Розподіл дотичних залишкових напруг у поверхневому шарі зразків зі сталі 25ХНЗМФА після чорнового точіння

Звичайний метод обробки без нагрівання при чорновому точінні ($t=18$ мм; $S=2,5$ мм/об; $V=15$ м/хв) і наступному чистовому точінні ($t=0,4$ мм; $S=0,06$ мм/об; $V=100$ м/хв) привів до появи залишкових напруг, розподіл яких описується кривими 1 і 2. Чистова обробка без нагрівання підвищує розтягувальні залишкові напруги на поверхні заготовки, а на глибині порядку 30 мкм напруга міняє знак. Якщо при тих же режимах різання виконати чорнову обробку заготовки із плазмовим нагріванням ($I=400$ А; $U=180$ В), то вихідний розподіл залишкових напруг (крива 3) суттєво відрізняється від розподілу при різанні без нагрівання (крива 1).

Чистова обробка після ПМО, виконана в тих же умовах, що й у першому варіанті технологічного процесу, приводить до розподілу залишкових напруг за аналогічним законом (крива 4), але величини розтягувальних напруг поблизу обробленої поверхні виявляються суттєво меншими (в 4...5 раз), що повинне сприятливо відбиватися на експлуатаційних показниках деталей. Отже, застосування чорнових операцій із плазмовим нагріванням при відповідному доборі режимів різання й параметрів плазмової дуги відкриває перспективу поліпшення експлуатаційних характеристик деталей шляхом формування сприятливої картини розподілу залишкових напруг.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Плазмово-механічна обробка (ПМО) являє собою комбінований процес, при якому механічна енергія й енергія низькотемпературної плазми спільно використовуються для підвищення ефективності процесу різання при виготовленні деталей машин із сучасних важкооброблюваних матеріалів.

Оскільки термічний цикл поверхневих шарів заготовки при плазмовому нагріванні, внаслідок структурно-фазових перетворень, істотно змінює їх фізико-механічні властивості у бік зменшення, з'являється можливість значно підвищити продуктивність обробки, забезпечуючи при цьому необхідну стійкість різального інструмента.

Металографічні дослідження шарів, що прилягають до обробленої поверхні металу, показують, що при раціональних режимах різання й нагрівання процес ПМО сталей (у тому числі й термооброблених) не тільки суттєво підвищує продуктивність операцій, але й дозволяє, як правило, одержати задану якість поверхневого шару деталей.

При високотемпературному підігріві жароміцних сплавів можлива поява приповерхнього шару зі зміненою дрібнозернистою структурою глибиною 0,2...0,6 мм, що, однак, не знижує якості обробленої поверхні.

Дослідження, показали, що при чорновому й напівчистовому точінні із плазмовим нагріванням шорсткість обробленої поверхні практично не відрізняється від шорсткості, отриманої при тому ж режимі різання без підігріву заготовки плазмовою дугою. Залишкові напруги в зовнішньому шарі формуються при ПМО як результат температурних і механічних деформацій, що відбуваються в металі під дією термічного циклу й процесу різання.

Застосування чорнових операцій із плазмовим нагріванням при відповідному доборі режимів різання й параметрів плазмової дуги відкриває перспективу поліпшення експлуатаційних характеристик деталей шляхом формування сприятливої картини розподілу залишкових напруг.

Висока ефективність ПМО робить актуальними подальші розробки, спрямовані на пошук нових способів застосування плазмової дуги для поверхневого нагрівання, знеміцнення припуску, що дозволило б значно підвищити продуктивність обробки важкооброблюваних матеріалів, за умовою забезпечення якості поверхневих шарів оброблюваних деталей

Список літератури

1. **Коротких М.Т., Шатерин М.А., Лаевский Г.Б.** Плазменно-механическое фрезерование труднообрабатываемых материалов. – Л.: ЛДНТП, 1988. – 24 с.
2. **Шатерин М.А., Коротких М.Т., Нечаев В.П.** Плазмотрон для плазменно-механической обработки. – «Сварочное производство», 1986, №8, - с.27, 28.
3. **Нечаев В.П., Рязанцев А.А.** Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагревом. – Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – Вип.26. Кривий Ріг, 2010. – с.157-160.
4. **Шатерин М.А., Коротких М.Т., Нечаев В.П.** Плазменно-механическое торцовое фрезерование. – Машиностроитель, 1986, №9.
5. **Шатерин М.А., Коротких М.Т.** Плазменно-механическое фрезерование фасок на кромках листов из стали 30X2H2M. – в сб.: Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – М.: МДНТП, 1981.
6. **Коротких М.Т., Ушомирская Л.А.** Особенности применения плазменного нагрева при обработке труднообрабатываемых материалов резанием. – Металлообработка. – СПб. №2 (68) 2012. – с. 23-27.
7. **Мрочек Ж. А., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л.** Плазменно-механическая обработка материалов. – Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого. – Гомель, №4 (26) 2006. – с. 44-47.
8. **Лоладзе Т.Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
9. **Подураев В.Н.** Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. –304 с.
10. **Нечаев В.П., Позняков И.Н.** Структурные превращения в срезаемом слое при плазменно-механической обработке. – «Плазмотехнология»: Сб. науч.тр. – Киев. – 1991. – С. 35-37
11. **Кунин В.С.** Опыт внедрения плазменно-механической обработки. – Л.: ЛДНТП, 1982. – 28с.
12. **Резников А.Н., Резников Л.А.** Энергетические расчеты при резании с плазменным подогревом обрабатываемого материала. – Энергомашиностроение, 1981, №11, с. 26-28
13. **The PERA «Cutfast» plasma-assisted Hot-machining process.** – Engineering Digest (Canada), 1977, 38, №7, p. 17.
14. **Вакаса Х.** Применение обработки резанием с плазменным подогревом. – Oyo kikai kogau (Mechanical Engineering Application), 1976, т. 17, №3, с. 54-59.
15. **Шатуров, Г. Ф.** Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – С. 460.
16. **Бобров В.Ф.** Основы теории резания металлов. М., «Машиностроение», 1975. – С.135-142.
17. **Резников А.Н., Шатерин М.А., Кунин В.С., Резников Л.А.** Обработка металлов резанием с плазменным нагревом. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
18. **Sun S., Brandt M., Dargusch M.S.** Thermally Enhanced Machining of Hard-to-Machine Materials. International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010, Vol. 50(8), p. 663–680.
19. **Madhavulu G., Ahmed B.** Hot Machining Process for Improved Metal Removal Rates in Turning Operations. Journal of Materials Processing Technology. –1994, Vol. 44, p. 199–206.
20. **Kitagawa T., Maekawa K.** Plasma Hot Machining for New Engineering Materials. Wear. – 1990, Vol. 139(2), p. 251–267.

Рукопис подано до редакції 12.12.2019