

УДК 621.787

І.В. Гурей, д-р техн. наук, проф., **В.І. Гурей**, канд. техн. наук, доц.
П.Р. Дмитерко канд. техн. наук, доц.
НУ «ЛП», ПЖ, м. Львів, м. Жешув, Україна, Польща

ФОРМУВАННЯ НАНОКРИСТАЛІЧНОГО ЗМІЦНЕНОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПІД ЧАС ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ

У статті проведені дослідження які вказують, що на формування зміцненого нанокристалічного білого шару впливають режими фрикційного зміцнення, форма і розміри робочої частини інструменту, жорсткість технологічної системи, застосовуване технологічне середовище. Зменшення жорсткої технологічної системи верстата та використання перервної робочої частини інструменту сприяє утворенню якісного, товстішого, з більшою твердістю зміцненого нанокристалічного білого шару після фрикційного зміцнення робочих поверхонь деталей машин.

Ключові слова: зміцнений нанокристалічний шар, режими фрикційного зміцнення, технологічне середовище, перервна робоча частина інструменту

1. Вступ

Фізико-хімічні та механічні процеси, які проходять у матеріалах, під дією макро- і мікросередовища та напруженого стану, спричиняють зміну експлуатаційних властивостей деталей машин. Зміна властивостей відбувається за рахунок трибологічних і втомних процесів, корозії, які локалізуються і проходять на поверхні та у поверхневому шарі деталей. Поверхневий шар – це шар обмежений зовнішньою реальною поверхнею виробу та частиною матеріалу, який є під поверхнею, і має змінені фізичні та деколи і хімічні властивості у порівнянні з основним матеріалом.

Стан поверхневого шару характеризується параметрами, які окреслюють стереометрію поверхні та визначають властивості підповерхневих областей. Вони залежать від властивостей самого матеріалу, а також умов утворення поверхні у процесі її обробки та умов експлуатації. Стереометрія поверхні визначається профілем, хвилястістю та шорсткістю. Важливий вплив має несучі поверхня та крива, що визначають реальні питомі напруження та навантаження, які виникають у процесі експлуатації деталей [1, 2].

У процесі виготовлення деталей під дією різних обробок у поверхневому шарі формуються залишкові напруження різні за величиною і знаком, мікро- і макротвердість, структура матеріалу, його фрагментація. Змінними є хімічні властивості та енергетичний стан поверхні, кількість дефектів по глибині та їх розподіл. Поєднання цих параметрів визначають опір поверхневих шарів і деталі на дії втомного навантаження, трибологічних, корозійних та ерозійних процесів. Від стану поверхневого шару металу, отриманого під час технологічного процесу виготовлення, залежать експлуатаційні властивості деталі і надійність виробу в цілому [1]. Тому необхідно виготовляти вироби з бажаними параметрами поверхні та властивостями поверхневого шару і створювати відповідні технологічні процеси для їх отримання. У цьому випадку великий інтерес представляють технології обробки поверхонь, основані на формуванні нанокристалічних структур у поверхневих шарах. Наноструктурний стан у тонких поверхневих шарах металевих деталей отримується при дії на них високококонцентрованих джерел енергії [3].

Метою даної роботи було проведення дослідження впливу жорсткості

технологічної системи, форми робочої поверхні зміцнювального інструменту на формування зміцненого нанокристалічного поверхневого шару під час фрикційного зміцнення деталей машин.

2. Основний зміст і результати роботи

Методи поверхневого зміцнення деталей машин, які модифікують поверхневі шари металу базуються на використанні висококонцентрованих джерел енергії, яка підводиться локально до оброблюваних поверхонь. До цих методів відноситься і фрикційне зміцнення. Під дією таких джерел енергії поверхневі шари металу нагріваються з великими швидкостями до високих температур, вище точки фазових перетворень, а також проходить їх високошвидкісне деформування. Дія концентрованого джерела енергії на оброблювану поверхню діє локально і дуже малий час ($\sim 10^{-3}$ с). Після припинення дії джерела енергії зона поверхневого шару металу за рахунок відводу теплоти у глибину металу охолоджується з великими швидкостями. Під час таких обробок відбувається високошвидкісне гартування металу поверхневих шарів деталей та проходять складні температурно-фазові перетворення. У поверхневих шарах змінюється структура, фізико-механічні та електрохімічні характеристики металу, які суттєво впливають на працездатність деталей машин у процесі експлуатації. Структура поверхневого шару після обробки висококонцентрованими джерелами енергії є нанокристалічною, тобто розмір зерна є меншим за 80-100 нм.

Основний шлях поверхневої наноструктуризації полягає у створенні у поверхневому шарі великої кількості дефектів і границь розділу, необхідних для переходу вихідної мікроструктури у структуру з нанорозмірними кристалами. При цьому грубозерниста структура в об'ємі матеріалу повинна залишатись незмінною. Фрикційне зміцнення є одним із найбільш сприятливих процесів, оскільки в зоні контакту інструмент-деталь проходить термопластична деформація з нагрівом вище точок фазових перетворень та наступним його швидким охолодженням, які додатково сприяють наноструктуризації поверхневих шарів металу шляхом коалесценції субзерен. Так як механізм коалесценції субзерен характеризується збереженням багатьох дефектів у динамічно рекристалізованих об'ємах, то зростає гетерогенність зміцненої поверхні, що суттєво впливає на корозійні властивості зміцненого шару. Процеси динамічної рекристалізації особливо інтенсивно розвиваються під час перервного фрикційного зміцнення (значні ударні навантаження у зоні контакту інструмент-деталь). Тому високу працездатність зміцненої деталі у конкретних умовах експлуатації можна забезпечити шляхом підбору оптимальних режимів зміцнення, геометричних параметрів робочої поверхні інструменту, необхідної жорсткості технологічної системи, підводу у зону обробки відповідних технологічних середовищ. Необхідною умовою формування якісних нанокристалічних структур у поверхневих шарах деталей машин під час фрикційного зміцнення є наявність у зоні контакту інструмент-деталь високих температур та напружень.

Фрикційне зміцнення деталей машин проводили на модернізованому плоскошліфувальному верстаті, на якому було забезпечено швидкість на периферії інструменту 60-65 м/с. Як зміцнювальний інструмент використовували металевий диск з нарізаними поперечними пазами на його робочій частині. Для зменшення жорсткості технологічної системи використовували спеціальний пристрій, на якому кріпили магнітну плиту.

Висококонцентрований потік енергії під час фрикційного зміцнення утворюється за рахунок високошвидкісного тертя інструменту по оброблюваній поверхні. Крім того, у зоні контакту інструмент-деталь у поверхневому шарі металу

виникають інтенсивні зсувні деформації. При використанні інструменту з нарізаними поперечними пазами на його робочій частині у зоні контакту додатково виникають ударні навантаження після проходження пазу. У зоні одиничного контакту поверхневого шару металу виникає складний температурно-напружений стан металу. Швидкість нагрівання локального об'єму металу поверхневого шару у зоні контакту інструмент-деталь становить $5 \cdot 10^5$ - $3 \cdot 10^6$ К/с, швидкість охолодження становить 10^4 - 10^6 К/с. Крім того, у зоні одиничного контакту відбувається циклювання нагрівання і охолодження за рахунок перервної поверхні робочої частини інструменту. Поверхневий шар металу нагрівається до температур вище точки фазових перетворень A_{C3} . За рахунок високошвидкісного нагрівання, циклювання температури, наступного високошвидкісного охолодження та інтенсивного ударного деформування локальної зони одиничного контакту формується нанокристалічний зміцнений поверхневий шар металу (білий шар). Отриманий зміцнений нанокристалічний шар має відмінний структурно-напружений стан металу, інші властивості як після звичайного гартування. Підвищується твердість, міцність та одночасно в'язкість сталей.

Під час фрикційного зміцнення у зону обробки подається технологічне середовище, яке усуває схоплювання інструмента і оброблюваної поверхні деталі та сприяє покращанню шорсткості зміцнюваної поверхні і якості деталі в цілому. У зоні обробки під дією високих температур та тисків мастило розкладається на атомарний вуглець та проходить його масоперенос у поверхневі шари оброблюваної деталі, що сприяє утворенню якісних зміцнених шарів. Крім того, під час фрикційного зміцнення виникають умови для цілеспрямованої зміни хімічного складу приповерхневих шарів шляхом подачі у зону фрикційного контакту спеціальних технологічних середовищ, які містять полімерні добавки вуглецю, азоту, бору, нікелю, хрому та ін. Під дією силового поля ювенільних поверхонь, що виникають під час обробки металу, відбувається механо- і термодеструкція поверхнево активних добавок технологічного середовища з утворенням атомів, які дифундують у деформований метал. Вони понижують рівень вільної поверхневої енергії та полегшують процеси пластичного деформування металу.

При використанні інструмента з поперечними пазами на його робочій частині проходить затягування технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь, що сприяє формуванню зміцненого нанокристалічного шару більшої товщини та мікротвердості.

Проведені експериментальні дослідження показали, що під час перервного фрикційного зміцнення сталі 40Х у загартованому і низьковідпущеному стані (ГНВ) у поверхневому шарі формується зміцнений нанокристалічний шар (білий шар). На формування зміцненого шару впливають режими обробки, форма робочої частини інструменту, жорсткість системи, застосовуване технологічне середовище та інші параметри.

Металографічні дослідження показали, що після фрикційного зміцнення сталі 40Х використовуючи технологічне середовище на основі мінеральної оливи з полімервмісними добавками формується нанокристалічний зміцнений шар. На поверхні формується градієнтна зерниста структура. Деформація у процесі обробки зменшується від максимальних значень на поверхні до нуля у недеформованій основі, тому картина мікроструктурних змін у деформованих шарах відображає характер і розподіл деформації, розмір, орієнтацію і геометрію зерен, а також формування у них дислокаційної структури. Величина зерна коливається у межах 20-80 нм, даний шар можна віднести до нанокристалічних структур.

Фазовий склад зміцнених сталей вивчали на дифрактометрі ДРОН-3 в $Fe-\alpha$

випромінюванні з $\lambda = 1,936 \text{ \AA}$. При обробці сталі 40X з вихідною ферито-перлітною структурою зміцнений шар після фрикційного зміцнення має ферито-аустеніто-мартенситну структуру ($\alpha\text{-Fe} - 35\%$, $\gamma\text{-Fe} - 65\%$). Параметр ґратки $\gamma\text{-Fe}$ $a = 3,6 \text{ \AA}$, що відповідає 1,2% вуглецю. Фазовий склад металу змінюється в залежності від температури, яка виникає у поверхневих шарах та залежить від геометричних параметрів зміцнювального інструменту, режимів обробки, жорсткості технологічної системи. Крім того, на поверхні утворюються оксиди FeO , Fe_3O_4 . Зі збільшенням деформування зони контакту інструмент-деталь збільшується густина дислокацій у поверхневому шарі, збільшується кількість залишкового аустеніту та зменшується величина блоків мозаїки (табл. 1).

Швидкість деформації поверхневого шару під час фрикційного зміцнення можна визначити, використовуючи залежність Джонстона і Гілмана [4] $\rho \approx 10^9 \epsilon$. Виходячи з даного рівняння швидкість деформування обробленої поверхні становить приблизно від $0,9 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$ до $1,7 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$. На швидкість деформування значний вплив має геометрія робочої частини інструмента (ширина та кількість пазів) та жорсткість технологічної системи. Під час фрикційного зміцнення інструментом з гладкою робочою частиною у поверхневому шарі металу проходить тільки швидкісне зсувне деформування за рахунок високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні. Застосовуючи інструмент з нарізаними поперечними пазами на робочій частині при проходженні паза над зоною контакту інструмент-деталь, проходить її розвантаження, пружна деформація поверхневого шару вивільнення і оброблювана поверхня повертаються у своє попереднє положення [5]. У момент входження у контакт наступної гладкої ділянки робочої частини інструмента відбувається ударне навантаження поверхневого шару деталі в зоні контакту інструмент-деталь. Одиначна зона контакту окрім зсувного деформування за рахунок високошвидкісного тертя навантажується ще за рахунок високошвидкісного ударного деформування.

Таблиця 1. Дані рентгенівського аналізу поверхні зразків сталі 40X у $\text{Fe}\alpha$ -випромінюванні з $\lambda = 1,936 \text{ \AA}$

Інструмент	Величина блоків, $D \times 10^{-6}$, см	Густина дислокацій, $\rho \times 10^{12}$, cm^{-2}	$\alpha\text{-Fe}$, %	$\gamma\text{-Fe}$, %
Поперечні пази, жорсткість 60 Н/мкм	1,34	1,8	60	40
Поперечні пази	1,41	1,5	65	35
Гладка робоча частина	1,86	0,9	78	22

Як показали металографічні дослідження товщина зміцненого шару, отриманого на загартованій і низьковідпущеній сталі 40X після фрикційного зміцнення залежить від режимів обробки, ширини і кількості поперечних пазів на робочій частині, а також від жорсткості технологічної системи. Зміцнення проводили використовуючи жорстке кріплення деталі на магнітній плиті, а також на пристрої з жорсткістю 60 Н/мкм, швидкість переміщення стола верстата була вибрана 4 м/хв. (рис. 1).

При малих значеннях вертикальної подачі товщина зміцненого шару є невеликою ($\sim 100 \text{ мкм}$) і мало залежить від геометрії робочої частини інструменту та жорсткості технологічної системи. Поверхневий шар недостатньо нагрівається, також є недостатнє деформування як зсувне, так і ударне зони одиначного контакту для

формування якісного товстого зміцненого шару. Зі збільшенням вертикальної і поперечної подачі при зміцненні товщина зміцненого шару зростає.

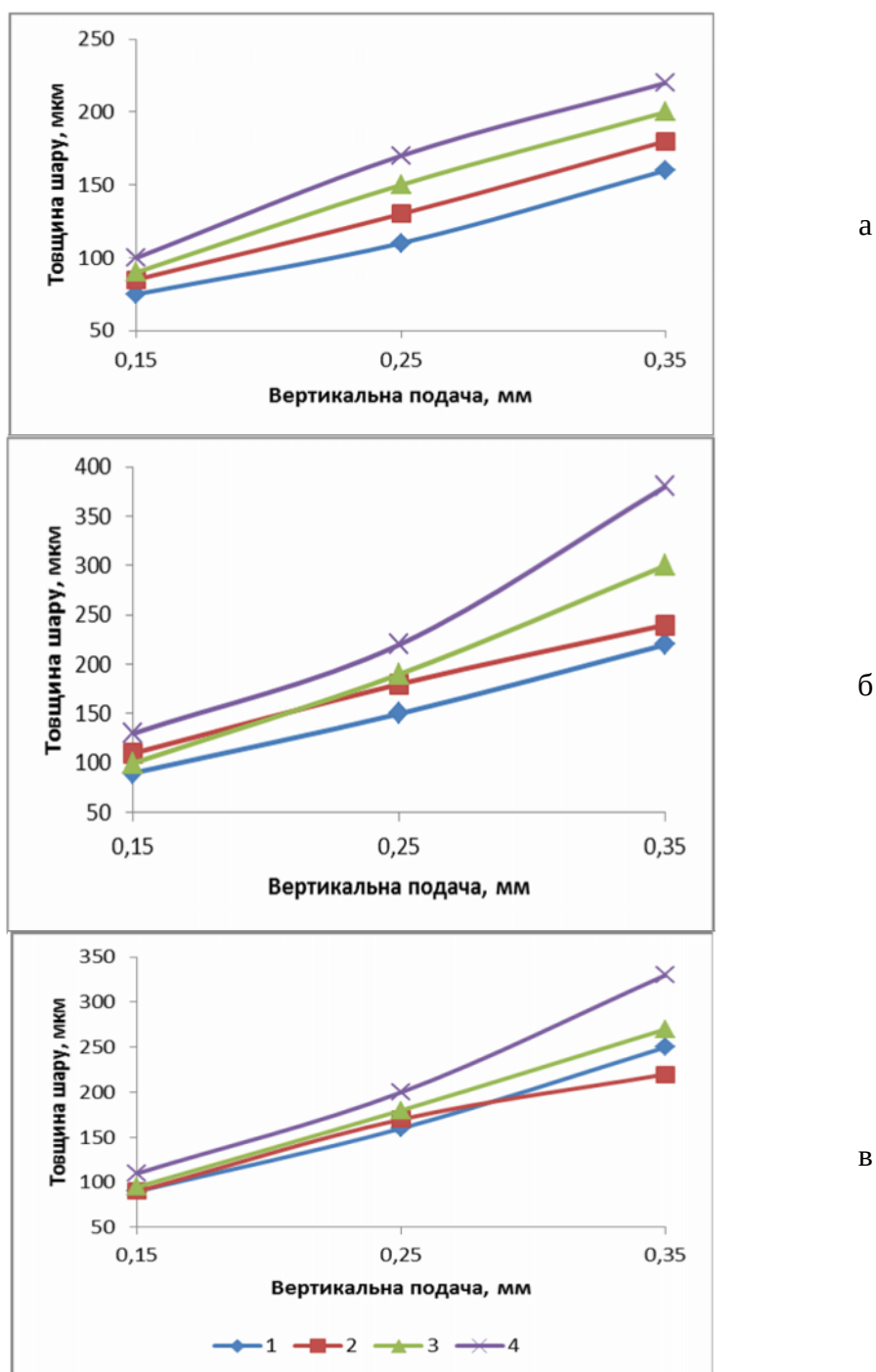


Рис. 1. Товщина зміцненого шару, отриманого після фрикційного зміцнення на сталі 40Х (ГНВ) від режимів обробки ($v_{cm} = 4$ м/хв): а – $s = 1,5$ мм/дв.хід; б – $s = 3$ мм/дв.хід; в – $s = 4,5$ мм/дв.хід; 1 – $s_n = 0,1$ кроку; 2 – $s_n = 0,25$ кроку; 3 – $s_n = 0,1$ кроку + пристрій; 4 – $s_n = 0,25$ кроку + пристрій

Зміна поперечної подачі впливає на кількість проходів інструменту по одному і

тому місцю обробленої поверхні. Встановлено, що найбільш сприятливим для формування якісного зміцненого шару є проходження 3-4 рази інструмента по одному і тому ж місцю. Ширина робочої частини інструмента становила 8-10 мм. Тому при зміцненні з поперечною подачею 3 мм/дв.хід стола верстата отримується зміцнений шар найбільшої товщини. При збільшенні ширини робочої частини інструменту можна збільшувати поперечну подачу інструмента і, відповідно збільшиться продуктивність обробки. Але у цьому випадку збільшиться площа контакту інструмент-деталь, а це приведе до зменшення питомого навантаження у зоні контакту, що негативно вплине на формування зміцненого шару. Для збільшення питомого тисків у зоні контакту необхідно збільшувати силу притиску інструменту до деталі, що збільшить навантаження на підшипники шпиндельного вузла та викличе їх передчасне зношування.

Збільшення вертикальної подачі приводить до збільшення товщини зміцненого шару. При цьому у зоні контакту збільшуються складові сили взаємодії інструмент-деталь, особливо нормальна та тангенціальні складові. Нормальна складова сили взаємодії P_y визначає навантаження, яке діє на підшипники шпиндельного вузла, а за тангенціальною складовою P_z визначається величина теплового потоку, який формується у зоні контакту інструмент-деталь і витрачається на формування зміцненого шару.

При використанні жорсткого пристрою для закріплення деталі зі збільшенням вертикальної подачі нормальна складова P_y сили взаємодії інтенсивно зростає. Тому збільшувати вертикальну подачу $t > 0,5$ мм не бажано, бо інтенсивно зростають навантаження на підшипники шпиндельного вузла.

На формування зміцненого шару суттєво впливає геометрія робочої частини інструмента та жорсткість технологічної системи. Експериментально встановлено, що зменшення жорсткості технологічної системи сприяє збільшенню товщини зміцненого шару. Так, використовуючи пристрій з жорсткістю 60 Н/мкм отримали, що товщина зміцненого нанокристалічного шару збільшилась до 370-380 мкм. При зміцненні деталі на жорсткому пристрої товщина шару становила 220-240 мкм. На товщину зміцненого шару суттєво впливають кількість нарізаних пазів на робочій частині інструменту та їх ширина. Так, найбільша товщина нанокристалічного шару (370-380 мкм) отримується при зміцненні інструментом з нарізаними поперечними пазами шириною 6 мм, що становить приблизно 0,25 кроку і використанні пристрою з жорсткістю 60 Н/мкм. Під час зміцнення інструментом з нарізаними поперечними пазами на його робочій частині, а також використання пристрою зі змінною жорсткістю, у зоні контакту інструмент-деталь виникають додаткові ударні навантаження, що приводить до збільшення товщини і мікротвердості зміцненого нанокристалічного шару у порівнянні з використанням інструменту з гладкою робочою частиною (рис. 2).

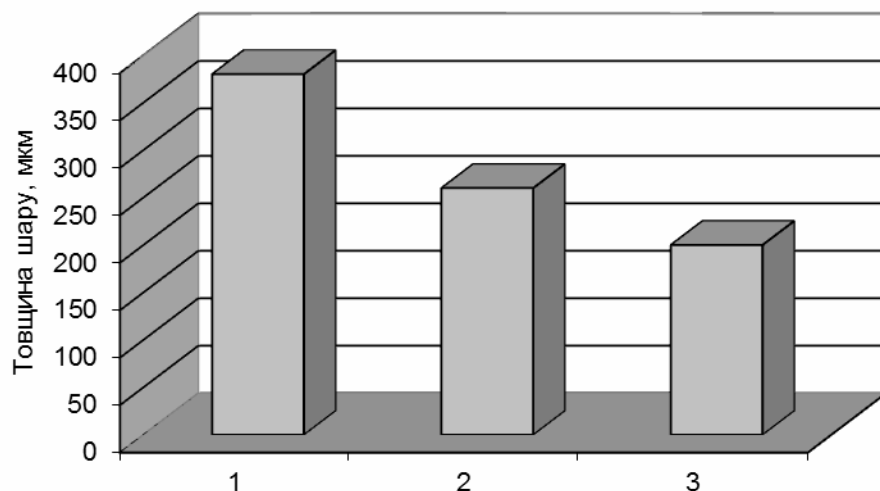


Рис. 2. Залежність товщини зміцненого шару після фрикційного зміцнення сталі 40Х у загартованому і низьковідпущеному стані від геометрії робочої частини інструменту та жорсткості системи: 1, 2 – поперечні пазы; 3 – гладка робоча частина; 1 – пристрій з жорсткістю 60 Н/мкм; 2 – жорсткий пристрій

Під час перервного фрикційного зміцнення деталей інструментом з поперечними пазами у зоні контакту інструмент-деталь виникають високочастотні імпульси теплової енергії за рахунок почергового проходження гладкої ділянки робочої частини та пазу. У зоні контакту проходить інтенсивне зсувне та ударне деформування поверхневого шару металу, яке сприяє текучості металу. Внаслідок чого у зоні контакту матеріал може перебувати одночасно у різних фазах стану (аустенітному, ферито-аустенітному та ферито-перлітному). Застосування інструмента з гладкою робочою частиною створює неперервний тепловий потік у зоні контакту інструмент-деталь, зсувне деформування є однонапрямленим та меншим за інтенсивністю. Використовуючи інструмент, який забезпечує більшу інтенсивність зсувного деформування та зменшену жорсткість системи ми отримуємо товстіший зміцнений шар. Це забезпечується інструментом з поперечними пазами і ще у більшій мірі використанням пристрою зі змінною жорсткістю.

Товщина зміцненого шару при одних і тих самих режимах обробки збільшується за рахунок інтенсифікації зсувного деформування та дії додаткових ударних навантажень у зоні контакту інструмент-деталь. Слід відмітити, що при застосуванні інструмента з поперечними пазами потужність, яка використовується на процес фрикційного зміцнення є меншою у порівнянні з використанням інструмента з гладкою робочою частиною.

Як показали металографічні дослідження зразків зі сталі 40Х (гартування і низький відпуск), найменша твердість отримана після фрикційного зміцнення зразків інструментом з гладкою робочою частиною, яка складала 8,1 ГПа при твердості основного металу – 5,1 ГПа (рис. 3). Використовуючи інструмент з нарізаними пазами на його робочій частині і жорсткий пристрій під час фрикційного зміцнення мікротвердість зміцненого шару зросла 8,6 ГПа. У даному випадку збільшилась і товщина зміцненого шару. Найбільшу мікротвердість, а також і товщину зміцненого шару отримали після фрикційного зміцнення інструментом з поперечними пазами на

його робочій частині і використанням пристрою зі зменшеною жорсткістю до 60 Н/мкм. Мікротвердість у цьому випадку становила 9,1 ГПа.

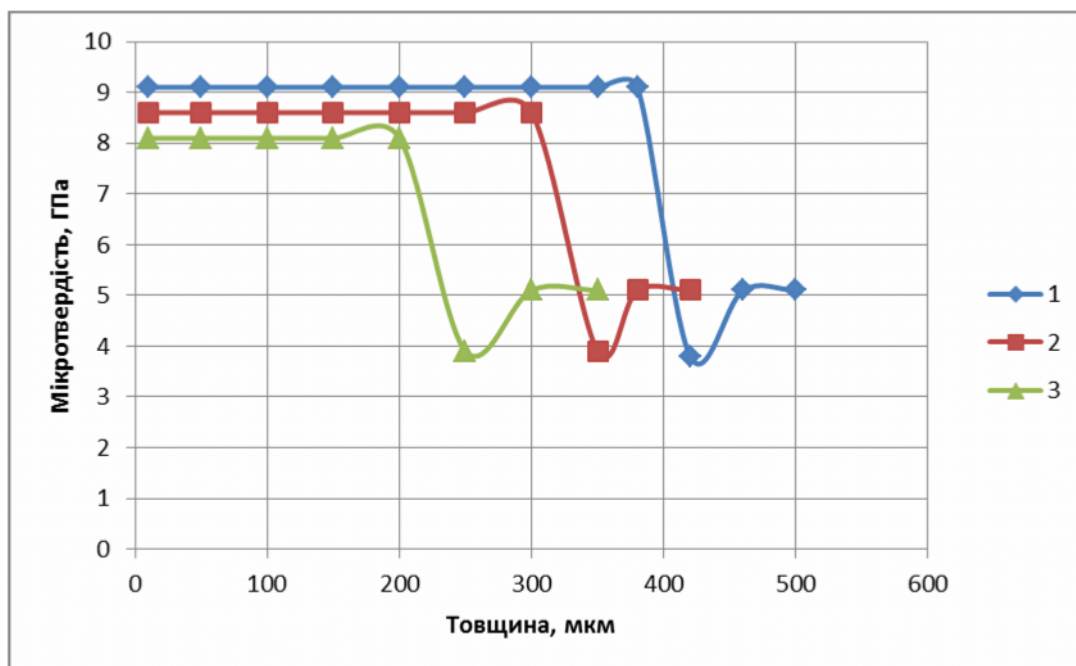


Рис. 3. Мікротвердість зміцненого шару після фрикційного зміцнення сталі 40Х у загартованому і низьковідпущеному стані інструментом з різною геометрією робочої частини: 1 – поперечні пази та пристрій з жорсткістю 60 Н/мкм; 2 – поперечні пази та пристрій з жорсткістю 60 Н/мкм; 3 – гладка робоча частина інструменту

Поверхневий модифікований шар, отриманий після фрикційного зміцнення складається зі зміцненого шару з підвищеною твердістю (білий шар) і з відпущеного шару (темний шар) з пониженою мікротвердістю, меншою, як основна структура. Відпущений шар отримується за рахунок того, що на даній глибині температурно-силові умови не достатні для формування білого шару, але температура є достатньою для відпуску попередньо загартованого металу зразка. Після фрикційного зміцнення незагартованого металу (після відпалу, нормалізації) зона темного шару не спостерігається. Зона відпуску з пониженою твердістю, яка знаходиться під зміцненим білим шаром є буферною зоною, при переході від зміцненого шару до основного металу. У даному випадку немає різкої зони переходу від зміцненого шару до основного металу. Дана зона відіграє позитивну роль при роботі деталей з втомними навантаженнями. Ще слід відмітити, що метал зміцненого шару і основи мають одну і ту ж кристалічну ґратку.

3. Заключення.

З проведених досліджень можна зробити висновок, що на формування зміцненого нанокристалічного білого шару впливають режими фрикційного зміцнення, форма і розміри робочої частини інструменту, жорсткість технологічної системи, застосовуване технологічне середовище. Зменшення жорсткої системи технологічної системи верстата та використання перервної робочої частини інструменту сприяє утворенню якісного, товстішого, з більшою твердістю зміцненого нанокристалічного

білого шару після фрикційного зміцнення робочих поверхонь деталей машин.

Список літератури:

1. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Корж В.М., Інженерія поверхні – новий технологічний напрямок виготовлення деталей машин і конструкцій / В.М. Корж, Ю.С. Попіль // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 92–94.
3. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
4. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986, 224 с.
5. Гурей В. І. Термонапружений стан поверхневого шару деталей машин під час фрикційного зміцнення / В. І. Гурей // Вісник СевНТУ. – Севастополь, 2012. Вип. 128/2012. – С. 47–53.

I.V. Gurey, V.I. Gurey, P.R. Dmiterko HARDENED LAYER OF NANOCRYSTALLINE MACHINE PARTS AT FRICTIONAL HARDENING

It is shown that in the surface layers the nanocrystalline hardened layer with a grain size of 80 nm in the process of friction hardening of machine parts are formed. The rigidity of the technological system, form and dimensions of the working part of the tool and technological environment to formation of the hardened layer (thickness, microhardness, grain size) are influence.

Keywords: reinforced nanocrystalline layer, modes of friction hardening technological environment, the continuous working of the instrument

И.В. Гурей, В.И. Гурей, П.Р. Дмитерко ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ФРИКЦИОННОМ УПРОЧНЕНИИ

В статье проведены исследования которые указывают, что на формирование упрочненного нанокристаллического белого слоя влияют режимы фрикционного упрочнения, форма и размеры рабочей части инструмента, жесткость технологической системы, применяемая технологическая среда. Уменьшение жесткости технологической системы станка и использование непрерывной рабочей части инструмента способствует образованию качественного, толстого, с большей твердостью упрочненного нанокристаллического белого слоя после фрикционного упрочнения рабочих поверхностей деталей машин.

Ключевые слова: упрочненный нанокристаллический слой, режимы фрикционного упрочнения, технологическая среда, непрерывная рабочая часть инструмента

Надійшла до редколегії 30.05.2013 р.