

УДК 539.3: 519:87 (045)

В. І. КАЛІНІЧЕНКО¹, В. Є. МАРЧУК², М. І. ДЕНИСЕНКО³, В. Ф. ЛАБУНЕЦЬ²,
В. В. ЗАГРЕБЕЛЬНИЙ²

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України

²Національний авіаційний університет

³Національний університет біоресурсів і природокористування України

ЕЛЕКТРОІСКРОВІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

В статті наведено і проаналізовано результати чисельних розрахунків залишкових напружень в ЕІЛ покриттях, визначена оптимальна їх товщина та щільність. Описана методика прикладення граничних умов до скінченно-елементних моделей, а також, на основі проведених розрахунків, обґрунтовано вибір оптимальної густини скінченних елементів при моделюванні.

Ключові слова: напружено-деформований стан, електроіскрове покриття, скінченно-елементна модель, дискретна структура

Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами. Сучасний розвиток машинобудування пов'язаний з застосуванням деталей складної конфігурації, велика частина з яких має низьку продуктивність при механічній обробці. Сьогодні економічно вигідним і технологічно перспективним у вирішенні проблем збільшення експлуатаційних характеристик різних деталей машин і різального інструменту, які піддаються інтенсивному зносу є метод електроіскрового легування (ЕІЛ). Завдяки широкій гамі матеріалів, які можуть бути використані при ЕІЛ, участі міжелектродного середовища в процесі формування поверхневих шарів, можна в широких межах змінювати механічні, термічні, електричні, термоємні й інші властивості робочих поверхонь деталей.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Найбільш успішно дискретні покриття, нанесені методом ЕІЛ, експлуатуються при зміцненні штампів, підвищуючи довговічність штампового оснащення в 2,6 разів, різального інструменту в 2,0 рази. Дискретне покриття тільки однієї полиці верхньої кільцевої канавки поршня двигуна внутрішнього згорання знизило в 4 рази сумарний знос циліндрово-поршневої групи автомобіля ВАЗ-2121 при пробігу 50 тис. км. [1; 2].

Завдяки застосуванню зносостійких дискретних покриттів на основі нітридів титану, алюмінію, хрому і цирконію на кераміці вдалося підвищити зносостійкість різців у порівнянні з керамічним різальним інструментом із суцільними покриттями при обробці загартованих інструментальних сталей ШХ15 і ХВГ [3]. При цьому дискретні покриття, на відміну від суцільних, забезпечують повну відсутність зношування різця в перші 10–13 хвилин точіння.

Відомо, що під час різання матеріалу, на різальний інструмент впливає багато різних факторів, таких як температура, абразивні частки, деформування різальної крайки, та ін. Але всі чинники врахувати не можливо. Тому в розрахунку використовували тільки основні фактори - температурні та силові навантаження. Як правило, найбільш небезпечним є процес врізання і момент виходу різального інструменту із заготовки, нерівномірні поля температур та напружень, що виникають, можуть вивести його з ладу.

Літературні джерела, в яких відображається основні причини виходу різального інструменту з ладу, зазначають, що основними причинами нагріву різаль-

ного інструменту є тертя його різальної крайки із стружкою та оброблюваною деталлю. Абразивне зношування інструменту відбувається за рахунок мікрорізання твердими частками оброблюваного матеріалу. А основним способом підвищення зносостійкості є нанесення суцільного та дискретного покриття. Зона контакту передньої та задньої грані різальної кромки із стружкою і оброблюваною деталлю знаходиться під впливом нерівномірного температурного та силового навантаження розподіленого за законом. Величину навантажень, закон їх розподілу, основні характеристики матеріалів інструменту і покриття визначають з літературних джерел та експериментальних випробувань [4].

Таким чином, інформація про величину та знак залишкових напружень необхідна для розрахунку міцності різального інструменту в умовах контактного навантаження, а також для прийняття рішення про необхідність їх зниження. Це обумовлює актуальність проведення досліджень у даному напрямку.

Мета дослідження. Дослідити величину та знак залишкових напружень електроіскрових покриттів на різальному інструменті в умовах контактного навантаження, а також для прийняття рішення про необхідність їх зниження.

Методика досліджень. Для спрощення розрахунку, напружено-деформований стан (НДС) визначаємо тільки в різальній крайці (рис. 1). Силове та температурне навантаження прикладаємо у вузлах та елементах моделі за функціональними залежностями в Декартові системі координат. Температуру на поверхні різального інструменту розглядаємо як конвекційний потік вздовж поверхні передньої та задньої грані.

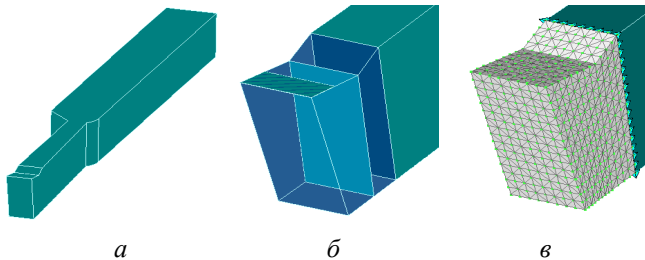


Рис. 1. Твердотільна модель різального інструменту (а), частина інструменту яку розглядаємо (б), розбиття її на скінченні елементи (в)

Методика розрахунку залишкових напружень полягає в тому, що будується твердотільна, та на її основі скінчено-елементна модель з покриттям, задаються необхідні фізико-механічні характеристики матеріалів основи і покриття та початкова температура, при якій відбувається формування покриття, по всьому периметру моделі задаються температурні складові у вигляді конвекційного потоку по поверхні. Проводиться розрахунок нестационарної задачі теплопровідності – моделюється процес охолодження деталі від температури нанесення $T_0=480^\circ\text{C}$ до кімнатної температури $T_1=20^\circ\text{C}$, після чого, отримані дані для температурного процесу, що стабілізувався, задають як початкові умови для розрахунку НДС моделі (рис. 2).

Проведені чисельні розрахунки по визначенню впливу товщини основи та покриття на величину залишкових напружень. При цьому були розроблені моделі з різною густиною скінчено-елементної сітки за якими визначали точність розрахунку та адекватність моделі. Кількість елементів першої моделі складала 15200, другої – 1680 елементів. Точність розрахунку визначали не лише за дефо-

рмацією пластинки, але й за величиною залишкових напружень в елементах на межі адгезійного контакту основи та покриття по товщині пластини.

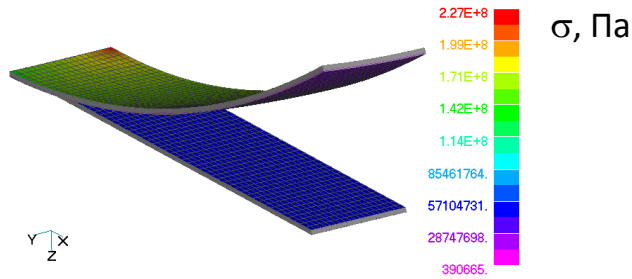


Рис. 2. Напружено-деформований стан пластинки Р6М5 з покриттям ВК8

Результати досліджень та їх аналіз. В результаті моделювання були побудовані графіки нормальних напружень вздовж осі X , за якими можна визначити величину залишкових напружень по товщині пластини (рис. 3). При проведенні розрахунків методом скінченних елементів виникає питання вибору оптимальної густини скінченних елементів. З одного боку, збільшення густини скінченних елементів веде до підвищення точності розрахунків. Однак, з іншого боку, це веде до збільшення часу потрібного на розрахунок.

Порівняння величини нормальних напружень та деформацій, при різній густині дискретизації пластинки на скінченні елементи, показало, що при меншій витраті часу на розрахунок, модель з меншою густиною сітки, дала досить низьку похибку, а тому для подальших розрахунків доцільно використовувати саме її. Тому розрахунки проводили на $1/4$ частині пластинки, оскільки вона має осі симетрії. Розміри скінчено-елементної моделі – $0,025 \times 0,005 \times 0,0002$ м, модель має 2232 вузлів та 1680 елементів.

Спільна дія контактних напружень і значних залишкових напружень може привести до порушення контактної міцності покриття. Тому наявність інформації про величину та знак залишкових напружень необхідна для розрахунку міцності різального інструменту в умовах контактного навантаження, а також для прийняття рішення про необхідність їх зниження.

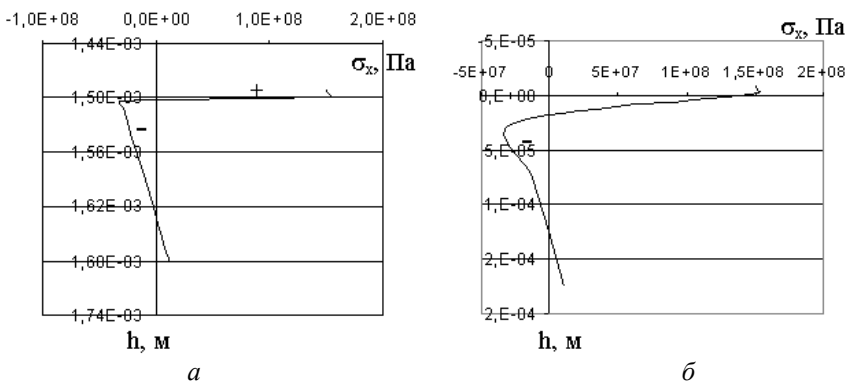


Рис. 3. Графік розподілу нормальних напружень по товщині пластини для моделей з різною густиною сітки: *a* – для моделі з густиною сітки 15200 елементів; *б* – для моделі з густиною сітки 1680 елементів

Експериментальні дослідження були проведені на фрагментах стрічкового біметалевого полотна з дискретним покриттям, розрахованим за оптимальним

НДС конструкції «основа-покриття». Перевірку оптимальності вибору геометричних параметрів дискретного покриття за отриманими розрахунками проводять шляхом випробувань їх на зносостійкість на різальному інструменті. Регулюючи щільність покриття, яка залежить від розміру дискрету, можна забезпечити умови, які оптимізують процес тертя і мінімізують процес зношування. Розрахована щільність покриття, що наносилась інтуїтивно-емпірично, була приблизно 85%, щільність покриття розрахованого за мінімальним НДС з оптимальними геометричними пропорціями була меншою за 60%.

Випробування проводили на фрагментах стрічкової біметалевої пилки з електроіскровим покриттям різної щільності та фрагментом без покриття. Режим різання: швидкість різання: $V_{\max} = 42$ м/хв; $V_{\min} = 12$ м/хв; подача – $S = 0,037$ мм/об; глибина різання – $t = 2$ мм. Критерій зношування по задній грані – $h = 0,5$ мм. На рис. 4 показано характер зносу різальної кромки до і після 15 хв точіння заготовки з сталі ШХ15, який визначають по задній грані. Знос в 0,5 мм є граничним. Кожні півтори хвилини зупиняли процес точіння і проводили замір зношення різальної кромки, будували графік залежності зношення від часу роботи інструмента (рис. 4).

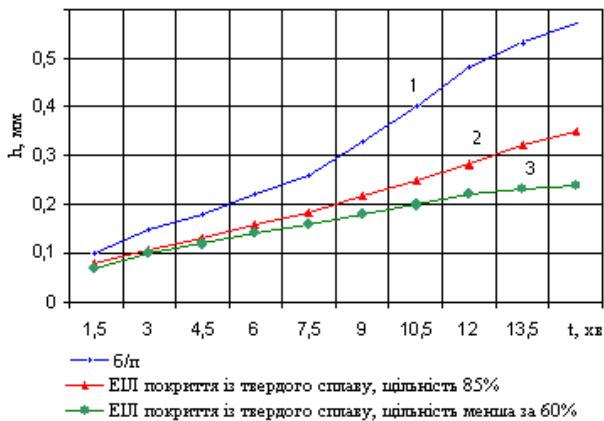


Рис. 4. Залежність величини зношування різальної частини пилки від часу роботи

При різанні металів і їх сплавів широке розповсюдження отримали універсальні біметалічні полотна с зубцями, виготовленими з швидкорізальної сталі М42 (аналог 11P2M10K8 ГОСТ 19265-88). Ця сталь високолегована молібденом і кобальтом має високу твердість і червонотійкість. Спеціальна пружинна сталь основи забезпечує їй міцність і довговічність що дозволяє мати значну перевагу над стрічковими пилками, виготовленими з високоякісної високолегованої інструментальної сталі, особливо у важких умовах експлуатації. Стрічкові полотна з твердосплавними зубцями використовуються для самих складних умов різання. Вони використовуються для різання важко оброблювальних матеріалів з високим складом нікелю і титану, а також чавунів і феромагнітних сплавів.

Використання стрічкових пилок з твердосплавними зубцями значно підвищує собівартість процесу різання заготовок. Тому застосовуються численні спроби зміцнення зубців полотен. Особливістю технології нанесення являється нанесення покриття несучільної дискретної структури, яке реалізували на біметалічній пилці з сталі М42, при цьому на задню поверхню різальної частини зуба наносили покриття з твердого сплаву групи ВК.

Проведені випробування і результати промислової експлуатації полотен SHL розміром $8800 \times 67 \times 1,6 \times 0,75/1,1$ мм підтвердили високу ефективність дискретного покриття. Так, при різанні високолегованих сталей (типу 42ХНМФА і 42ХМ4 ГОСТ 4543-88), стійкість зміцнених полотен майже в 2 рази вища, ніж у не зміцнених (рис. 5).

Щільність покриття, нанесеного інтуїтивно-емпірично складала 85 %, а як відомо щільність безпосередньо залежить від розміру дискретної ділянки. За розрахованими даними [7], з умови оптимальності геометричних параметрів дискретного покриття за мінімальним НДС, було нанесене ЕІЛ покриття на полотно SGLB $8800 \times 67 \times 1,6 \times 1,1/1,5$, отримана щільність такого покриття була меншою за 60%. Площа порізаного матеріалу полотном з ЕІЛ покриттям з щільністю 60 % зростає від 3,7 до 5 раз, в порівнянні з полотном без зміцнення (рис. 6). Полотно зі зміцнюючими захисними покриттями, по стійкості наближаються до коштовних аналогів с зубцями з твердого сплаву, а за економічною ефективністю мають перевагу. Використання зміцнених пилок дозволить підвищити рентабельність використання стрічково пильного обладнання і тим самим знизити затратний механізм ціноутворення готової продукції.

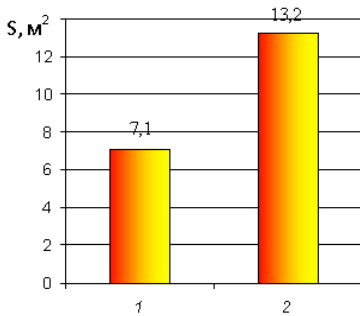


Рис. 5. Площа порізаного матеріалу:
1 – полотном без зміцнення;
2 – полотном з ЕІЛ покриттям (щільність покриття 85%)

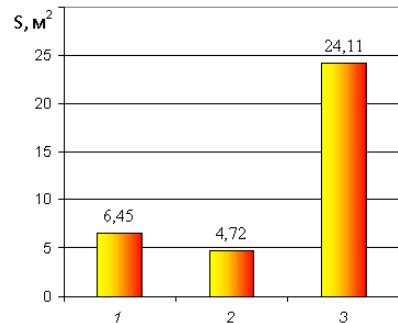


Рис. 6. Площа порізаного матеріалу:
1, 2 – полотном без зміцнення;
3 – полотном з ЕІЛ покриттям (щільність покриття до 60%)

Висновки:

1. Проведені експерименти показали, що, формуючи дискретні структури на різальних крайках інструменту, можна одержати градієнтні покриття з необхідною структурою і властивостями, що дозволяє збільшити зносостійкість поверхневого шару. Враховуючи ці особливості необхідно на різальних кромках інструменту формувати покриття змінної товщини у відповідності з епіюрами нерівномірного зношування;

2. Зміна щільності ψ дискретного покриття змінює механізм зношування. При $\psi < 60\%$ спостерігається адгезійний механізм зношування. В інтервалі $\psi = 60 \dots 70\%$ має місце абразивний механізм зношування. При $\psi > 70\%$ спостерігається зношування відшаруванням і викришування часток покриття;

3. Дослідження експлуатаційних характеристик інструментальних матеріалів з покриттями показали, що вони можуть бути застосовані при значно високих режимах різання, в порівнянні з звичайними інструментальними матеріалами без покриття;

4. За результатами розрахунку НДС різального інструменту з матеріалу Р6М5 із покриттям ВК8 під дією контактного навантаження визначені граничні

розміри дискретного фрагменту. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що зменшення розміру фрагмента дискретного покриття призведе до зниження дотичних напружень на поверхні адгезійного контакту «покриття-основа»;

5. Експериментальні випробування підтвердили високу ефективність оптимізованих геометричних параметрів дискретного покриття, розрахованих з врахуванням оптимального НДС на різальному інструменті типу пилок, працездатність яких зросла від 2...5 раз.

Список літератури

1. Антонюк В. С. Дискретні покриття на різальному інструменті [Текст] / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, Б. А. Ляшенко, А. В. Рутковський // Проблеми прочності. – 2007. – №1. – С. 138–143.
2. Антонюк В. С. Выбор параметров покрытий дискретной структуры при модификации поверхности режущего инструмента [Текст] / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, Б. А. Ляшенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – №3. – С. 49–50.
3. Фоменко С. Н. Повышение эксплуатационных характеристик инструментальных материалов на основе нитрида кремния нанесением износостойких покрытий: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы» [Текст] / Фоменко С. Н. – Киев, 1997. – 19 с.
4. Сорока Е.Б. Оптимизация дискретной структуры при поверхностной электроконтактной закалке [Текст] / Е.Б. Сорока, Ю.С. Самогутина, С.А. Клименко, В.И. Калиниченко // Междунар. конф. „Инженерия поверхности и реновация изделий”. – Киев: АТМ України, 2006. – С. 83–85.
5. Антонюк В.С. Аналітичні та числові методи проектування дискретних покриттів на інструментальних матеріалах [Текст] / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, Є.К. Солових, В.І. Калініченко // Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. – Львів, 2006. – Т.1. – 273 с.

Стаття надійшла до редакції 04.10.2016

V. I. KALINICHENKO, V. E. MARCHUK, M. I. DENISENKO, V. F. LABUNETS, V. V. ZAGREBELNIY

ELECTRIC SPARK COATING FOR STRENGTHENING OF CUTTING TOOL

The article describes and analyzes the results of the numerical calculations of new residual stresses in EIL surfaces defined by their optimal thickness and density. The described method of applying boundary conditions to the finite-element models and, based on the calculations, reasonable choice density of finite element at modeling.

Keywords: mode of deformation, electric spark coating, finite element description, discrete structure

Калініченко Віталій Іванович – кандидат технічних наук, с.н.с., с.н.с. відділу міцності елементів конструкцій з функціональними покриттями, kalinichenko_vitalii@ukr.net

Марчук Володимир Єфремович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри логістики Національного авіаційного університету, sunduk_2005@ukr.net

Денисенко Микола Іванович – к.т.н, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ.

Лабунець Василь Федорович – к.т.н., професор кафедри машинознавства Навчально-наукового Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ.

Загребельний Володимир Вікторович – аспірант кафедри машинознавства Навчально-наукового Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ.