

## Вплив імпульсів електричного струму та криогенних температур на міцність різальних твердосплавних пластин

Л. С. Новогрудський, В. О. Стрижало, О. Б. Сорока, Ю. М. Родічев,  
М. Я. Оправхата

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

*Досліджено вплив імпульсів електричного струму і охолодження до температури 77 К на міцність різальних твердосплавних пластин при згині. Установлено ефективність різних режимів їх модифікації.*

**Ключові слова:** імпульси електричного струму, криогенні температури, міцність при згині, різальні твердосплавні пластини.

**Вступ.** Одним із перспективних напрямків підвищення міцності, ресурсу та експлуатаційних властивостей металевих виробів, що використовуються в різних галузях промисловості, є застосування в технологічних процесах їх виробництва електромагнітної обробки, зокрема електричного струму (ЕС) [1]. Досвід використання ЕС для модифікації металевих матеріалів із метою формування певної структури поверхневих шарів і підвищення роботоздатності виробів є досить великим. Це і термічна обробка матеріалів та виробів в так званих “індукційних печах”, в яких внаслідок прояву скін-ефекту (проникнення магнітного поля на певну глибину) від дії наведеного ЕС утворюється поверхневий шар металу з високою температурою, і нагрівання поверхні металу при прямому пропусканні струму високої частоти. Високочастотний струм характеризується нерівномірним розподілом по перерізу виробів: його максимальне значення на поверхні зменшується за експоненціальним законом у глиб матеріалу з відповідним розподілом температури [2]. Широкого розповсюдження отримали також комбіновані методи модифікації структури поверхневих шарів, наприклад електромеханічна обробка, за якої одночасна або послідовна дія ЕС і механічного навантаження поверхні дозволяють суттєво впливати як на фізико-механічні й експлуатаційні властивості поверхні, так і на матеріал у цілому [3].

Відкриття електронно-пластичного ефекту (ЕПЕ) [4] стимулювало розвиток нових напрямків використання ЕС у технологічних процесах модифікації структури металевих матеріалів, їх обробки та формоутворення. Даний ефект, зумовлений, власне, прямою дією ЕС (потoku електронів) на пластичну деформацію металу (дислокації та сукупність дислокацій) [5], має місце в металевих матеріалах, що знаходяться під навантаженням, і проявляється в зростанні деформації під час дії струму (так звана “електропластична” деформація). Для реалізації ЕПЕ необхідно створити певні умови, за яких швидкість руху електронів повинна перевищувати швидкість руху дислокацій [6]:

$$V_e \geq V_g, \quad (1)$$

де  $V_e$  і  $V_g$  – відповідно швидкості руху електронів і дислокацій.

Оскільки  $V_e = j/en_0$ , де  $j$  – густина струму;  $e$  – заряд електрона;  $n_0$  – кількість електронів в одиниці об’єму, то у відповідності з умовою (1) сила, що прискорює рух дислокацій, повинна бути пропорційна густині струму. Тому для досягнення ЕПЕ

використовують імпульси електричного струму (ІЕС), що дозволяє отримувати високу його густину за мінімального розігріву [5, 7].

Численні дослідження впливу ІЕС на механічні властивості, граничний стан, анізотропію, напружено-деформований стан та структуру металевих матеріалів [8–11] дають можливість визначити оптимальні режими обробки та напрямки дії ІЕС на метали і сплави. Особливо необхідно підкреслити, що дія ІЕС певних параметрів у визначених режимах обробки може покращувати однорідність структури металів та сплавів [12], заліковувати тріщини [13], гальмувати розвиток дефектів [14].

Відкриття ЕПЕ дозволяє також розробляти нові технології електрообробки швидкокрижучих сталей та виробів із них. Так, обробка ІЕС інструментів із вольфрамомолібденових сталей Р6М5 та Р18 сприяє підвищенню їх зносостійкості [15] за рахунок виділення внаслідок дії ІЕС дрібнодисперсних карбідів, утворення карбідів ванадію, хрому, вольфраму. Ці процеси сприяють зміні концентрації легуючих елементів у твердому розчині або дисперсійному твердінню, що й призводить до покращення експлуатаційних показників інструменту. Підкреслимо, що на відміну від “індукційної обробки”, пряма дія ІЕС певних параметрів охоплює не лише поверхневі шари інструменту, а й весь його об’єм.

Застосування комбінованого методу (попередня обробка струмом із подальшою дією магнітним полем) дозволяє суттєво збільшити ефективність модифікації, підвищити твердість та стійкість тврдосплавних пластин [16, 17]. За таких умов енергія магнітного поля, що розсіюється в твердому сплаві, витрачається на структурні перетворення та зміну внутрішніх полів напружень. Попередня обробка ІЕС призводить до розігріву матеріалу, що полегшує протікання таких процесів, тим самим знижуючи рівень напруженості магнітного поля, необхідного для досягнення ефектів зміни в структурі. Перетворення структури зумовлюють покращення фізико-механічних характеристик сплавів. Напрацювання на відмову оброблених за такою методикою різальних тврдосплавних пластин зі сплавів ВК8 і Т15К6 виявилось відповідно у 1,83 і 2,0 раза більшим, ніж у необроблених.

Як відомо, при зниженні температури змінюються механічні (міцність, пластичність, твердість, крихкість, в’язкість) та фізичні (теплові, магнітні, електричні) властивості металевих матеріалів [18, 19]. Тобто обробка холодом дає можливість цілеспрямовано впливати на властивості матеріалів, підвищуючи експлуатаційні параметри виробів. Наприклад, глибоке охолодження після загартування є найбільш ефективним засобом отримання високих значень твердості хромистих сталей. Так, для сталі Х12 після загартування, охолодження до 198 К й тривалого відпуску досягається твердість 67 HRC. Іншими методами таку твердість для цієї сталі отримати неможливо. Показано [20], що обробка холодом може бути ефективною для інструментальних сталей і сплавів. Так, охолодження до температури 173 К швидкокрижучої сталі Р18 після загартування призводить до перетворення 83% аустеніту в мартенсит, що сприяє підвищенню її твердості на 13 HRC. Стійкість фрез із цієї сталі після обробки холодом при фрезеруванні деталей з аустенітних сталей вища за стійкість необроблених фрез на 46%. За такої термічної обробки інструменту з цієї сталі оптимальна температура охолодження дорівнює 143 К, а найбільший ефект отримано при одноразовому охолодженні [20].

За певних умов обробка холодом різальних пластин із карбіду вольфраму зменшує зношування їх задньої поверхні при точінні сталі С45. При цьому зменшується також зусилля різання та підвищується якість обробки поверхні деталі [21]. У той же час відомі результати, коли така обробка може зменшити довговічність інструменту з карбіду вольфраму та карбіду титану [22]. Глибоке охолодження (до температури 77 К) суттєво погіршує работоздатність вставок із карбіду титану з покриттям TiAlN (за критерієм максимального торцевого зносу – 0,6 мм згідно з

рекомендаціями ISO 3685-93). Але обробка холодом до температури 163 К підвищує їх работоздатність на 40%.

Таким чином, і дія ІЕС, і охолодження до криогенних температур можуть змінювати механічні властивості і структуру швидкоріжучих та аустенітно-мартенситних сталей.

Метою виконаних досліджень є експериментальне визначення впливу ІЕС та криогенних температур на міцність напайних і багатогранних змінних неперезагострюваних твердосплавних пластин для ріжучого інструменту.

**Методика досліджень.** Об'єктом дослідження слугували вибрані багатогранні змінні неперезагострювані пластини з титановольфрамового сплаву Т15К6 (далі – змінні пластини) у формі неправильного шестикутника завтовшки 4,8 мм із центральним отвором діаметром 5,0 мм (рис. 1,*а*) та напайні пластини з вольфрамокобальтових сплавів ВК3 та ВК8 товщиною 6,0 і 7,9 мм відповідно (рис. 1,*б*), що випускаються промисловістю.

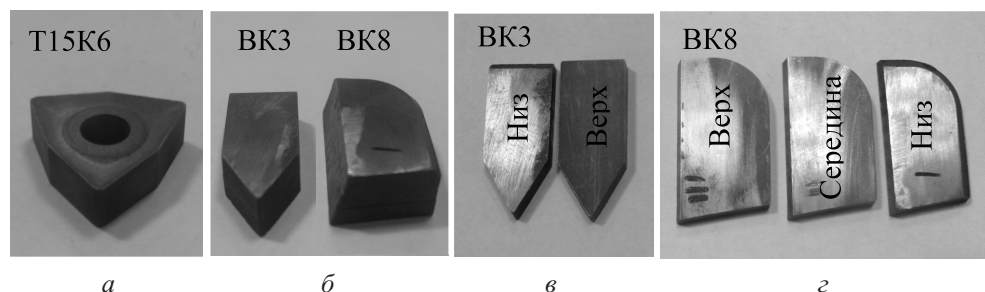


Рис. 1. Багатогранні змінні (*а*), напайні (*б*) твердосплавні пластини та вирізані з них зразки (*в*, *г*).

Для оцінки міцності напайних пластин кожен з них по товщині розрізали в поздовжньому напрямку методом електроерозійної різки на два і три зразки однакової товщини (рис. 1,*в,г*). Використання таких зразків замість рекомендованих нормативним документом для випробувань на міцність твердих сплавів [23] дало можливість оцінити фактично конструкційну міцність об'єктів з урахуванням впливу модифікації. На триточковий згин випробовували змінні пластини і вирізані зразки з напайних пластин у вихідному стані, після обробки імпульсами електричного струму та охолодження.

Модифікацію з охолодженням було реалізовано на зразках, вирізаних із пластин зі сплавів ВК3 і ВК8. Для зменшення рівня термічних напружень, що виникають при охолодженні твердосплавних пластин і зумовлюють порушення їх цілісності, охолодження зразків до температури 77 К проводили поступово з використанням рідкого азоту. Зразок, затиснений між електричними контактами з приєднаними до них гнучкими струмопідводами, розміщували в криокамері. Для поступового охолодження в криокамеру за допомогою підвищувача тиску з дьюарівської посудини спочатку подавали холодні пари азоту. Поступово, збільшуючи тиск в дьюарівській посудині, знижували температуру зразка (швидкість охолодження складала  $\sim 10$  град/хв). Через певний час ( $\sim 20 \dots 30$  хв) у криокамеру починав поступати рідкий азот. Зразки за температури 77 К витримували протягом години. Частину зразків зі сплаву ВК3 витримували за такої температури 162 години.

Напівсинусоїдальні ІЕС створювали за допомогою спеціальної апаратури випробувальної установки УТН-10. Через пластини пропускали, у відповідності до задач досліджень, від 20 до 100 ІЕС. Амплітуда імпульсів у залежності від типу пластини і місця вирізки сягала 2660...2880 А, причому для кожного зразка вона мала сталі значення; тривалість імпульсу завжди складала  $10^{-2}$  с. Інтервали між імпульсами

дорівнювали 10...15 с. Цього було достатньо для охолодження пластин до температури оточуючого середовища, їх інтегрального розігріву не відбувалося. Максимальний приріст температури, зафіксований термопарою, що встановлювалася на поверхні пластин, складає 12 К при випробуваннях на повітрі.

Ефект від обробки холодом та ІЕС при випробуваннях на міцність твердо-сплавних пластин оцінювали як різницю їх міцності при триточковому згині у вихідному стані та після обробки. Після обробки пластини випробовували за кімнатної температури.

**Результати досліджень.** Змінні пластини зі сплаву Т15К6 випробовували на згин у вихідному стані та після обробки ІЕС. При навантаженні пластини розташовували таким чином, щоб у зоні розтягу знаходилася або поверхня з різальною кромкою, або протилежна їй опорна поверхня. Це дало можливість оцінювати і зіставляти значення міцності при згині обох частин різальних пластин, що відрізняються формою та технологією оброблення. Результати випробувань змінних пластин зі сплаву Т15К6 у вихідному стані за температури 293 К наведено в табл. 1.

Т а б л и ц я 1

**Міцність при згині змінних пластин зі сплаву Т15К6**

№ пластини	$P_{\max}$ , Н	$\sigma_{зг}$ , МПа	$ \bar{\sigma}_{зг} - \sigma_{зг} $ , МПа	$\bar{\sigma}_{зг}$ , МПа	$S$ , МПа
1	6200	606	36	642	85
2	5600	547	95		
3	6500	635	7		
4	5800	567	75		
5	8200	801	159		
6	8800	860	218		
7	7000	684	42		
8	8200	801	5	796	82
9	8550	836	40		
10	9050	884	88		
11	6800	664	132		

**Примітка.**  $P_{\max}$  – максимальне навантаження на зразки.

У пластинах № 1–7 у зоні розтягу знаходилася поверхня з різальною кромкою, у пластин № 8–11 – з опорною. Як видно з даних табл. 1, значення границі міцності при згині  $\sigma_{зг}$  суттєво залежать від того, яка поверхня знаходиться у зоні розтягу. Так, середні значення  $\bar{\sigma}_{зг}$  для цих поверхонь відрізняються на 154 МПа, причому більшими вони є для зразків з опорною поверхнею у зоні розтягу. Необхідно відмітити, що значення середньоквадратичних відхилень  $S$  границь міцності при згині для обох поверхонь у зоні розтягу практично однакові, в той час як максимальний розкид значень  $\sigma_{зг}$  ( $\sigma_{зг}^{\max} - \sigma_{зг}^{\min}$ ) для пластин із різальною кромкою у зоні розтягу складає 40% від  $\bar{\sigma}_{зг}$ , а з опорною – 28%.

Обробка змінних пластин зі сплаву Т15К6 ІЕС (20 імпульсів на кожен пластину,  $I = 2620$  А) призводить до зміни значень характеристик міцності (табл. 2). Середні значення  $\bar{\sigma}_{зг}$  збільшуються на ~9% для обох випадків навантаження пластин. При

цьому їх розкид зменшується з 40 і 28% до обробки ІЕС до 23 і 18% після обробки для поверхні з різальною кромкою і опорної поверхні у зоні розтягу відповідно. Аналогічно змінюються також значення середньоквадратичного відхилення границь міцності при згині. Такі зміни характеристик міцності сплаву свідчать про підвищення однорідності його структури, фазові та інші зміни після дії ІЕС [14, 15].

Т а б л и ц я 2

**Міцність при згині змінних пластин зі сплаву Т15К6 після обробки ІЕС**

№ пластини	$P_{\max}$ , Н	$\sigma_{зг}$ , МПа	$ \bar{\sigma}_{зг} - \sigma_{зг} $ , МПа	$\bar{\sigma}_{зг}$ , МПа	$S$ , МПа
1	6500	635	62	697	68
2	8100	795	98		
3	6800	664	33		
4	9800	957	91	866	72
5	8000	782	84		
6	8800	860	6		

**Примітка.** Пластини № 1–3 – у зоні розтягу знаходилася поверхня з різальною кромкою, пластини № 4–6 – у зоні розтягу опорна поверхня.

Встановлена закономірність зменшення міцності поверхні пластин із різальною кромкою у зоні розтягу по відношенню до частини пластини з опорною поверхнею може бути зумовлена певною концентрацією напружень внаслідок складної форми поверхні з різальною кромкою та можливою підвищеною її дефектністю внаслідок цього. Для зменшення дефектності поверхні пластин з різальною кромкою такого типу ефективною є технологія магнітоабразивної обробки, яка дозволяє підвищувати якість поверхневого шару виробів складної форми [24].

Зразки, вирізані з напайних пластин зі сплавів ВК3 і ВК8, випробовували на триточковий згин за температури 293 К без попередньої обробки, після охолодження (при 77 К) та дії ІЕС ( $I = 2670...2740$  А для ВК3,  $I = 2820...2910$  А для ВК8). Значення  $\sigma_{зг}$  порівнювали для зразків у вихідному стані і після обробки. Зразки вирізали з однакових частин пластин, причому при випробуваннях зразків зі сплаву ВК3 в зоні розтягу знаходилася поверхня з різальною кромкою (в табл. 3–6 позначено – “верх”) або опорна поверхня (позначено – “низ”). Середній зразок зі сплаву ВК8 при випробуваннях розміщували так, щоб у зоні розтягу була поверхня, що прилягала до частини пластини з різальною кромкою.

Як видно з даних табл. 3, на відміну від короточасного охолодження, довготривала витримка за температури 77 К суттєво пошкоджує сплав: значення  $\sigma_{зг}$  за таких умов зменшується на 28% порівняно з необробленими зразками. При цьому значення  $\sigma_{зг}$  для зразків, вирізаних із нижньої частини пластини, більші, ніж для зразків, вирізаних із верхньої частини.

Обробка ІЕС за температур 293 і 77 К протягом однієї години призводить до зменшення  $\sigma_{зг}$  сплаву ВК3 порівняно з міцністю необробленого сплаву (табл. 4). Слід зазначити, що обробка ІЕС зразків за температури 293 К після їх тривалого охолодження протягом 162 годин при температурі рідкого азоту нівелює негативну дію низької температури (табл. 3, 4). Такий вплив ІЕС на міцність сплаву ВК3 після тривалої витримки за температури 77 К, вірогідно, пов'язаний з впорядкуванням його феромагнітної структури. Про підвищення однорідності структури сплаву внаслідок

дії струму також свідчить встановлене зменшення різниці між значеннями  $\sigma_{зг}$  зразків, вирізаних з однієї пластини зі сплаву ВКЗ, зі зростанням кількості імпульсів ЕС, що були пропущені через матеріал (рис. 2). Після певного напрацювання ЕС структура вирізаних зразків вирівнюється, значення границь міцності при згині стають однаковими.

Т а б л и ц я 3

Міцність при згині ( $\sigma_{зг}$ , МПа) зразків пластин зі сплаву ВКЗ

Зона вирізки	Режим обробки		
	Без обробки	Витримка при 77 К, 1 год	Витримка при 77 К, 162 год
Верх	1225	1130	875
Низ	1313	1285	937

Т а б л и ц я 4

Міцність при згині ( $\sigma_{зг}$ , МПа) зразків пластин зі сплаву ВКЗ після обробки ІЕС

Зона вирізки	Режим обробки			
	50 імпульсів при 293 К	Витримка при 77 К, 1 год, 50 імпульсів при 77 К	Витримка при 77 К, 1 год, відігрівання до 293 К, 50 імпульсів при 293 К	Витримка при 77 К, 162 год, відігрівання до 293 К, 50 імпульсів при 293 К
Верх	1085	1035	1142	1213
Низ	1113	1305	1102	1334

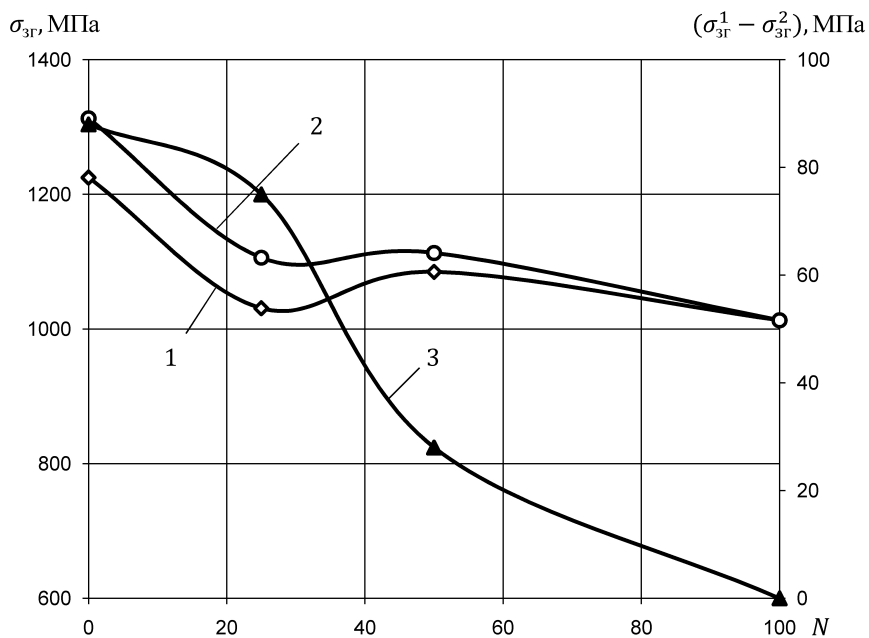


Рис. 2. Вплив ІЕС на міцність при згині зразків зі сплаву ВКЗ: 1 –  $\sigma_{зг}^1$  (верх); 2 –  $\sigma_{зг}^2$  (низ); 3 –  $\sigma_{зг}^2 - \sigma_{зг}^1$  (N – кількість ІЕС).

Отримані результати випробувань зразків пластин зі сплаву ВК8 свідчать про наступне (табл. 5). Міцність при згині окремих частин пластин зростає в напрямку від поверхні з різальною кромкою до опорної поверхні як для пластин без обробки, так і після охолодження за температури 77 К (на 69 і 34% відповідно).

При обробці ІЕС така закономірність порушується (табл. 6). Після обробки ІЕС найменш міцною є середня частина пластини, а найбільш близькі значення  $\sigma_{зг}$  мають зразки, оброблені після відігрівання до температури 293 К. Після обробки зразків пластин зі сплаву ВК8 за таким режимом їх номінальна міцність (середнє значення для трьох частин) на 37% більша, ніж необроблених. Для окремих зон вирізки значення  $\sigma_{зг}$  збільшується нерівномірно. Так, для верха, середини та низа воно складає 85, 19 і 25% відповідно. Такий розподіл міцності свідчить про певну нерівномірність структури по товщині пластин, яка утворилась при їх виготовленні. У той же час обробка холодом та ІЕС призводить до зменшення розкиду значень  $\sigma_{зг}$ .

Т а б л и ц я 5

Міцність при згині ( $\sigma_{зг}$ , МПа) зразків пластин зі сплаву ВК8\*

Зона вирізки	Режим обробки	
	Без обробки	Витримка при 77 К, 1 год
Верх	706	826
Середина	1063	1063
Низ	1196	1110

Т а б л и ц я 6

Міцність при згині ( $\sigma_{зг}$ , МПа) зразків пластин зі сплаву ВК8 після обробки ІЕС

Зона вирізки	Режим обробки		
	50 імпульсів при 293 К	Витримка при 77 К, 1 год, 50 імпульсів при 77 К	Витримка при 77 К, 1 год відігрівання до 293 К, 50 імпульсів при 293 К
Верх	1144	930	1309
Середина	827	868	1270
Низ	1078	1598	1497

**Висновок.** Отримані результати вказують на перспективність досліджень [25] по оцінці впливу охолодження до 77 К та дії ІЕС на механічні характеристики твердо-сплавних пластин із метою підвищення їх роботоздатності за рахунок встановлення найбільш ефективних технологічних режимів і параметрів такої обробки.

Роботу виконано в рамках науково-технічного проекту НАН України № 3 “Розробка технологій модифікації інструментальних матеріалів для важкого машинобудування, оптимізованих за параметрами міцності і працездатності, та впровадження у виробництво”.

\* Міцність досліджених пластин зі сплавів ВК3 і ВК8 значною мірою визначається дефектністю, пов’язаною з технологією їх виготовлення. Наявність дефектів у пластинах зі сплаву ВК8 певною мірою нівелює ефект зміцнення, зумовлений більшим вмістом кобальту порівняно зі сплавом ВК3 (табл. 3).

## Резюме

Исследовано влияние импульсов электрического тока и охлаждения до температуры 77 К на прочность режущих твердосплавных пластин при изгибе. Установлена эффективность разных режимов их модификации.

1. *Кривоглаз М. А., Садовский В. Д., Смирнов Л. В., Фокина Е. А.* Закалка стали в магнитном поле. – М.: Наука, 1977. – 120 с.
2. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. – М.: Мир, 1971. – 359 с.
3. *Гурьев А. В., Дудкина Н. Г., Федоров А. В.* Влияние электромеханического упрочнения на механические свойства углеродистой стали // Физ.-хим. механика материалов. – 1990. – № 3. – С. 26–30.
4. *Троицкий О. А.* Электромеханический эффект в металлах // Журн. exper. и теорет. физики. Письма в ред. – 1969. – 10, № 1. – С. 18–22.
5. *Спицын В. И., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
6. *Кравченко В. Я.* Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // Журн. exper. и теорет. физики. – 1966. – 51, № 6. – С. 1676–1681.
7. *Батаронов И. Л.* Механизмы влияния электрического поля на пластическую деформацию металлов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Воронеж, 2000. – 39 с.
8. *Новогрудский Л. С.* Прочность сталей при воздействии электрического тока и криогенных температур // Прочность и разрушение сталей при низких температурах. – М.: Металлургия, 1990. – С. 203–208.
9. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 504 с.
10. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Оправхата Н. Я.* Влияние электрического тока на механические характеристики рельсовой стали // Пробл. прочности. – 2010. – № 4. – С. 145–153.
11. *Novogradskii L. S.* Ultimate state criteria of structural alloys exposed to the action of electric current pulses // Proc of the 11th Int. Conf. on Fracture (Mach 20–25, 2005, Turin, Italy). – Paper 3731.
12. *Баранов Ю. В., Тананов А. И., Корягин С. Н. и др.* Субструктурные изменения в меди при импульсном воздействии электромагнитного поля // Физика и химия обраб. материалов. – 1990. – № 4. – С. 113–118.
13. *Финкель В. М., Головин Ю. И., Иванов В. М. и др.* Об упрочнении металла в устье трещины, обтекаемой импульсом тока // Там же. – 1981. – № 2. – С. 31–37.
14. *Барышев Г. А., Головин Ю. И., Киперман В. А. и др.* Структурные изменения в металле вблизи отверстий и включений под влиянием импульса тока // Там же. – 1980. – № 4. – С. 12–15.
15. *Баранов Ю. В.* Фазовые превращения в инструментальных сталях при обработке импульсным электрическим током // Вестн. науч.-техн. развития. – 2009. – № 7 (23). – С. 24–35.
16. *Овчаренко А. Г., Козлюк А. Ю., Курепин М. О.* Метод повышения износостойкости металлорежущего инструмента // Ползуновский альманах. – 2011. – № 4. – С. 161–163.



17. Козлюк А. Ю., Овчаренко А. Г., Курепин М. О. Обоснование схемы комбинированной магнито-импульсной обработки твердосплавного режущего инструмента // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1/1. – С. 131–134.
18. Солнцев Ю. П., Ермаков Б. С., Слепцов О. И. Материалы для низких и криогенных температур: Энциклопедический справочник. – СПб: Химиздат, 2008. – 768 с.
19. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
20. Клименко А. П., Новиков Н. В., Смолянский Б. Л. и др. Холод в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1968. – 248 с.
21. SreeramaReddy T. V., Sornakumar T., VenkataramaReddy M., and Venkatram R. Machining performance of low temperature treated P-30 tungsten carbide cutting tool inserts Machining performance of low temperature treated P-30 tungsten carbide cutting tool inserts // Cryogenics. – 2008. – **48**, Issues 9-10. – P. 458–461.
22. Singh Gill S., Singh J., Singh H., and Singh R. Investigation on wear behavior of cryogenically treated coated tungsten carbide inserts in turning // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2011. – **51**, Issues 1. – P. 25–33.
23. ГОСТ 20019-74. Сплавы твердые спеченные. Метод определения предела прочности при поперечном изгибе. – Введ. 01.01.76.
24. Родичев Ю. М., Сорока Е. Б., Майборода В. С. и др. Влияние модификации поверхности твердосплавного инструмента на сопротивление разрушению режущей кромки при локальном нагружении // Тез. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. “Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении”. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2014. – С. 205–206.
25. Пат. України № 89642. Спосіб підвищення зносостійкості металевих матеріалів / Л. С. Новогрудський, В. О. Стрижало, О. Б. Сорока та ін. – Чинний від 25.04.2014.

Поступила 20. 06. 2014