

9. Hashin, Z., & Shtrikman, S. A. (1963). Variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *J. Mech. Phys. Solids*, 11, 127–140.
10. Guz, A.N. (1993). *Mehanika kompozitov [Mechanics of composites]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
11. Doi, H., Fujiwara, Y., Miyake, K., et. al. (1970). A systematic investigation of elastic moduli of WC-Co alloys. *Met. Trans.*, 1, 5, 1417–1425.
12. Krawits, A.D., Reichel, D.G., & Hittemen, R. L. (1989). Thermal expansion of tungsten carbide at low temperature. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 72, 3, 515–517.
13. Kornienko, A.O. (2013). Napruheno-deformovanui stan u kompozitsiinomu materiali pry terti za pidvushchenukh temperatur [Stressed-deforming mill for composite material when rubbing due to increased temperatures]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Problems of friction and wear*, 2, 88–91 [in Ukrainian].
14. Krawits, A.D., Reichel, D.G., & Hitteman, R. (1989). Residual stress and stress distribution in a WC–Ni composite. *Mater. Sci. and Eng.*, 119, 1/2, 127–134.

УДК 620.178.152.341.4:621.744: 666.798.2

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-400-407

Т. О. Псярнецька, мол. наук. спів.; **М. О. Цисар**, канд. техн. наук; **О. О. Лешук**, д-р техн. наук; **Т. О. Косенчук**, мол. наук. спів.; **В. В. Івженко**, канд. техн. наук;
В. І. Щидловський, зав. гр.

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,
04074 м. Київ, e-mail: t_tsysar@ism.kiev.ua*

МІКРОТВЕРДІСТЬ КІЛЬЦЕВИХ ВИРОБІВ З КЕРАМІЧНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ SiC ПІСЛЯ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ

Наведено приклади розрахованого розподілу ізоліній температури у заготовці, що формується в прес-формі для виготовлення кільця з пластифікованого керамічного матеріалу на основі SiC. Описано процедуру підготовки зразка із заготовки для дослідження на мікротвердість. Проведено індентування зразка та отримано зображення уколів при різних зусиллях навантаження на індентор. Встановлено залежність мікротвердості від зусилля навантаження. Побудовано 3D-ману розподілу мікротвердості по площині осьового переріза зразка.

Ключові слова: інжекційне лиття, карбід кремнію, комп'ютерне моделювання, індентування, мікротвердість.

Вступ

За останні роки у практиці виготовлення керамічних виробів значне розповсюдження знайшов метод інжекційного формування (ІФ). Ця технологія еволюціонувала від виробництва гребінців та кнопок до основних споживчих, промислових, медичних та аерокосмічних виробів складної форми. Сутність методу полягає у тому, що для виготовлення виробів готується термопластична маса на основі керамічного порошку і зв'язуючого. В подальшому вона інjektується в прес-форму за рахунок пластичної течії під дією тиску. При цьому пластична деформація або крихке руйнування частинок порошку практично відсутні. Відносне переміщення частинок і їх щільне укладання можливі тільки за наявності між ними прошарку пластифікатору-зв'язуючого, який, разом із полегшенням

ковзання частинок порошку одна відносно одної і стінок прес-форми, додає заготівкам деяку додаткову адгезійну міцність за рахунок клеючої здатності.

Проектування прес-форм для інжекційного лиття та оптимізація параметрів процесу інжекційного формування вимагає детального вивчення всіх факторів, що впливають на його результативність. При оптимізації режимів вивченню підлягають зони, що недоступні для безпосереднього дослідження та візуального спостереження. У зв'язку з необхідністю комплексного вивчення всіх процесів, що виникають при заповненні прес-форми та її остиганні, актуальним є використання методів комп'ютерного моделювання. Комп'ютерне моделювання дозволяє інтерпретувати процеси, що відбуваються в закритій порожнині, в якій неможливо розмістити відповідні датчики. Проте, процес моделювання не завжди дає відповіді на всі питання. Крім того, ряд факторів в моделях неможливо врахувати внаслідок відсутності відповідного математичного апарата. Саме для цього і проводять комбіновані експериментально-розрахункові дослідження. Перевагою такого підходу є підтвердження інформації, отриманої в результаті моделювання, доповнення модельного представлення новими закономірностями та математичним апаратом.

На даний час існує достатня кількість публікацій [1–6], в яких висвітлені питання підготовки наповнювача, керамічних порошків, їх сумішей, аналізу властивостей спечених матеріалів, проте деякі

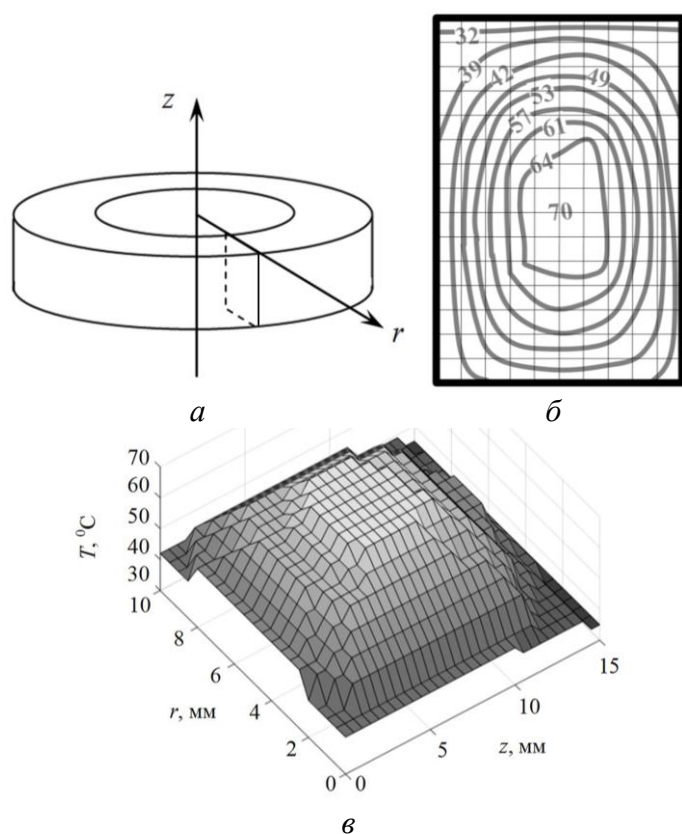


Рис. 1. Схематичне зображення заготовки у формі кільця з осьовим перерізом (а) і поле температури в ньому через 7 с після інжектування: 2D-зображення (б), 3D-зображення (в)

проміжні етапи методу інжекційного формування досі не досліджені у повній мірі. Одним з таких є інжекційне лиття у прес-форму і формування властивостей матеріалу литтєвих заготовок. В цій роботі ми пропонуємо дослідження зразка литтєвої заготовки у формі кільця з пластифікованого керамічного матеріалу на основі порошку SiC методом мікроіндентування і побудову поля мікротвердості по площині осьового переріза заготовки, а також співставлення цих даних з попередніми результатами моделювання полів температури при інжекційному литті таких виробів [7, 8] (рис. 1).

В процесі інжекційного лиття відбувається ущільнення

термопластичної маси, яке продовжується ще декілька секунд після повного заповнення прес-форми. Якщо температура термопластичної маси біля стінок форми миттєво падає до температури затвердіння зв'язуючого, то в її центральній частині вона спадає більш повільно і залишається близькою до температури плавлення зв'язуючого протягом 5–10 с. Таким

чином, ущільнення матеріалу по всьому об'єму заготовки відбувається нерівномірно, що призводить до неоднорідності властивостей литтєвого виробу.

В даній роботі ми пропонуємо досліджувати литтєву заготовку виробу з пластифікованого керамічного матеріалу методом мікроіндентування з побудовою поля мікротвердості по площині осьового переріза кільця (див. рис. 1, *a*). Це дасть змогу оцінити ступінь неоднорідності ущільнення термопластичної маси в заготовці у порівнянні з неоднорідністю розподілу температури в ній (див. рис. 1, *б, в*).

При постановці експериментальної задачі було зроблено ряд припущень:

- максимальне ущільнення є в центральній зоні осьового переріза сформованої заготовки, де мають місце максимальне значення температури (див. рис. 1, *б*) і, відповідно, найповільніше остигання;
- заповнення є рівномірним без можливого відриву застиглих частинок термопластичної маси біля стінок прес-форми в результаті дії гідравлічного удару.

Для отримання максимально достовірних результатів індентування необхідно вибрати оптимальні значення зусилля навантаження та кроку між уколами [9]. Оптимальні умови навантаження були визначені за результатами дослідження залежності мікротвердості від зусилля навантаження. Мінімальне значення відстані між уколами регламентується відстанню між температурними ізолініями (див. рис. 1, *б*), максимальне – відстанню між уколами згідно ДСТУ ISO 6507-1:2007 [10], що складає 2–2,5 довжини діагоналі уколу.

Підготування зразків

За допомогою ручного інструменту типу лобзик марки Sparta 240245 з ріжучим полотном марки KL-0002 із стандартними зубцями (ширина полотна – 0,5 мм, товщина – 0,25 мм) [11, 12] відрізаємо сегмент кільця (рис. 2).

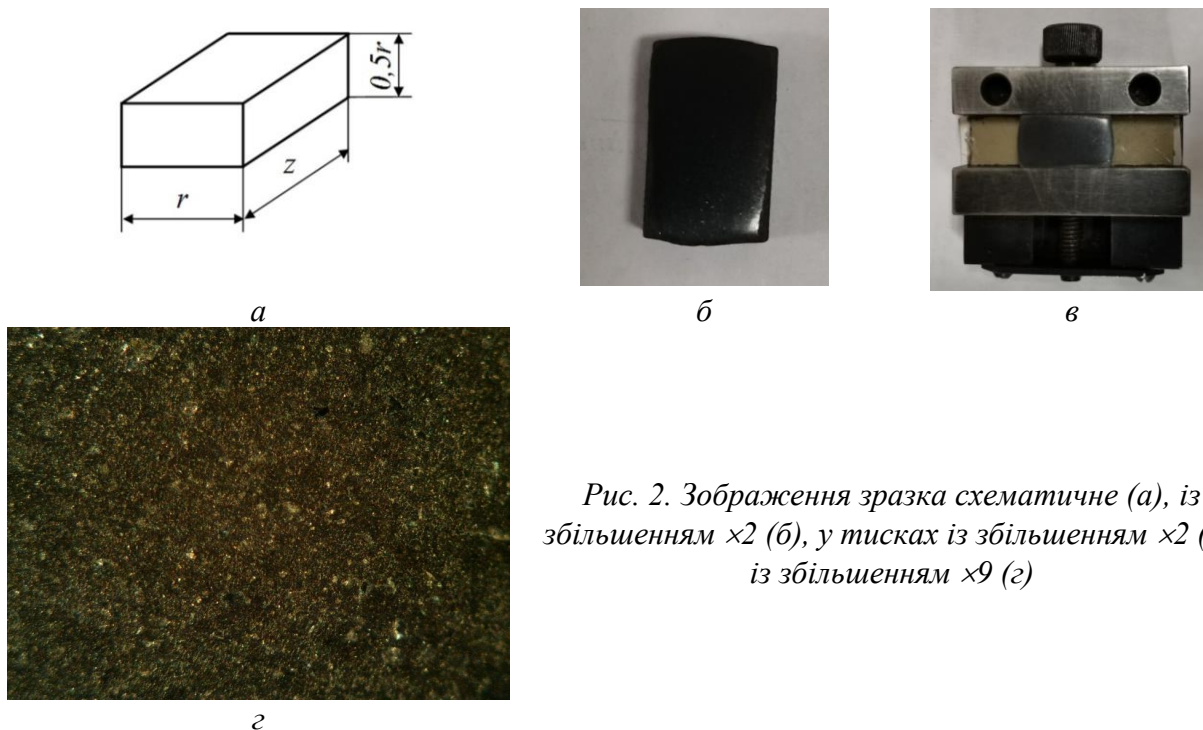


Рис. 2. Зображення зразка схематичне (*a*), із збільшенням $\times 2$ (*б*), у тисках із збільшенням $\times 2$ (*в*), із збільшенням $\times 9$ (*г*)

Швидкість різання повинна бути однаковою протягом усього процесу підготовки зразка. Для уникнення накопичування зрізаної маси в площині перерізу її потрібно регулярно прибирати за допомогою повітряного струменя. Це необхідно для того, щоб частки кераміки

(вихідного порошку) не формували неконтрольовані глибокі борозни. Також слід уникати сколів зразка в процесі різання та контролювати зношення зубців.

Попередня обробка зразка здійснюється шліфувальним папером PS30, кінцева обробка – технічним бархатом ХБ (з фабричною вогнетривкою обробкою) щільністю 460 г/м² для досягнення плоскопаралельності досліджуваної поверхні. Обробка здійснюється рівномірними повздовжніми рухами. Швидкість повздовжньої подачі при обробці не повинна бути високою, оскільки це може призвести до розтоплення зв'язуючого, опущення часток кераміки в більш низькі шари зразку та нанесу шарів зв'язуючого на поверхню, що спотворить експериментальні дані. Також зауважимо, що, незважаючи на досить великий залишок зв'язуючого, зразок є крихким, тому слід уникати надмірного натискання, що може призвести до його часткового або повного руйнування.

Дослідження та результати

Індентування проводили на приладі ПМТ-3. Зображення відбитків було отримано за допомогою біологічного мікроскопу *Skydust* моделі *XSP-1406* із максимальним збільшенням

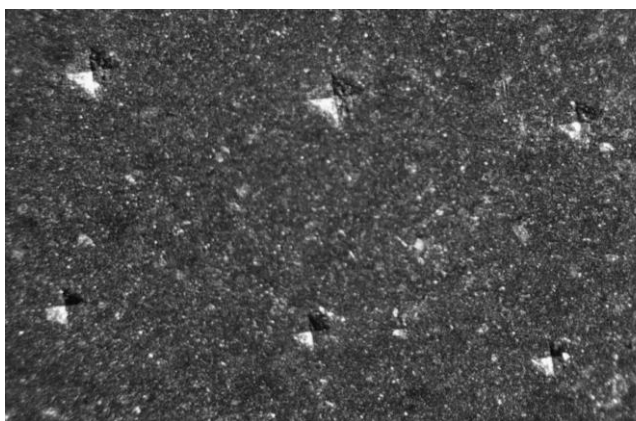


Рис. 3. Зображення уколів при зусиллі на індендор 0,2 та 0,5 Н

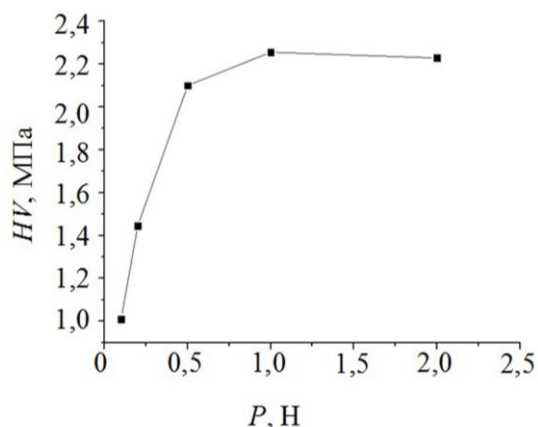


Рис. 4. Залежність мікротвердості від зусилля індентування

1200 крат, оснащеного цифровою приставкою роздільною здатністю 5 мегапікселів. Оскільки такі матеріали досліджували вперше, потрібно було впевнитись, що експеримент відповідає законам механічної подібності [13]. Для цього провели серію уколів з різними зусиллями на індендор та визначили залежність мікротвердості від їх величини. На рис. 3 видно дві лінії таких уколів, отриманих при різному зусиллі навантаження.

Слід зазначити: при малих навантаженнях на індендор випробовування гетероструктури, що складається із зерен керамічного порошку та зв'язуючого (див. рис. 2, з), може призводити до визначення мікротвердості зв'язуючого, а не матеріалу литцевої заготовки в цілому. А збільшення навантаження при індентуванні може спотворювати експериментальні дані, так як окремі агломеровані компоненти інжектваного пластифікованого керамічного матеріалу заготовки можуть налипати на індендор та відриватись від відбитку, руйнуючи його діагоналі. Такі викривлення можуть призвести до похибки від 10 до 25%, що є неприпустимим. Таким чином, перед експериментатором постає питання вибору оптимального значення

зусилля навантаження на індендор. Для цього було проведено серію уколів з різним навантаженням (див. рис. 3) (по 10 уколів на кожне зусилля індентування): 0,1; 0,2; 0,5; 1,0

та 2,0 Н. За усередненими значеннями експериментальних даних побудовано залежність мікротвердості від зусилля навантаження на індентор (рис. 4).

Як видно із рис. 4, в діапазоні зусиль індентування 0,1–0,5 Н значення мікротвердості змінюються суттєво, після чого спостерігаємо незначні їх відхилення від зусилля. Звідси вважаємо – для визначення мікротвердості матеріалу заготовки з термопластичної маси є дійсними зусилля на індентор від 0,5 Н. Оскільки при уколї із зусиллям 1,0 Н отримали відбиток із чіткими краями (рис. 5), прийняли рішення, що подальші дослідження повинні проводитися саме при цьому значенні зусилля індентування. Середнє значення діагоналі відбитку за 10 уколами склало 250 мкм. Таким чином, згідно з ДСТУ ISO 6507-1:2007 [10] уколи проводили з мінімальним кроком 500 мкм між центрами індентування.

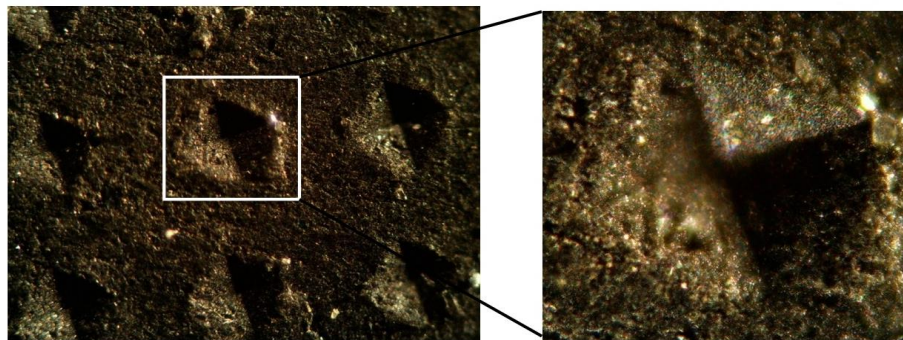


Рис. 5. Відбитки уколів на поверхні переріза литтєвого зразка з термопластичної маси на основі SiC

Перерахунок параметрів відбитка при заданому зусиллі дозволив сформувати матрицю мікротвердості та побудувати 3D-мапу розподілу мікротвердості по площині осьового переріза зразка (рис. 6).

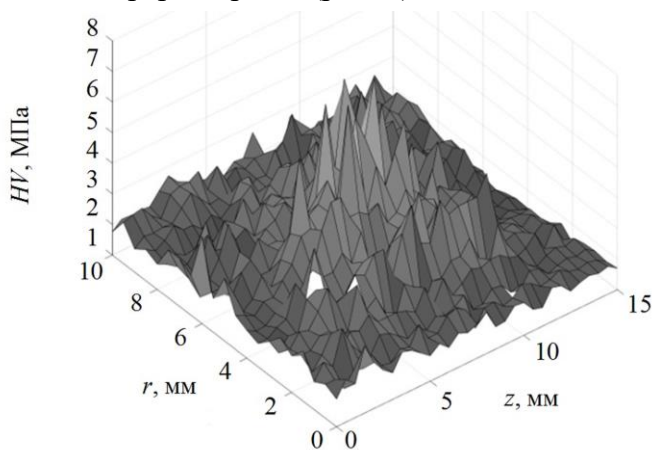


Рис. 6. 3D-зображення поля мікротвердості в площині осьового переріза кільцевої заготовки

Як видно, максимальні значення мікротвердості мають місце в зоні найповільнішого застигання (див. рис. 1, б, в), що відповідає максимальному ущільненню пластифікованого керамічного матеріалу заготовки при її застиганні в прес-формі. Таким чином, утримання тиску в прес-формі протягом декількох десятків секунд після інжектування є рекомендованим технологічним рішенням, що забезпечує допресовку термопластичної маси в кільцевій заготовці.

Висновки

Проведено дослідження мікротвердості пластифікованого керамічного матеріалу заготовки, отриманої після інжекційного лиття у прес-форму для виготовлення керамічного виробу у формі кільця. Встановлено залежність мікротвердості від зусилля індентування і побудовано 3D-мапу розподілу мікротвердості по площині осьового переріза заготовки.

Представлений в статті комплексний підхід до аналізу ущільнення пластифікованого керамічного матеріалу заготовки, отриманої методом інжекційного лиття, підтверджує достовірність комп'ютерного моделювання теплового стану прес-форми в процесі інжекційного лиття і дає можливість в подальшому використовувати отримані результати при проектуванні найбільш ефективних прес-форм та підборі оптимальних параметрів процесу інжекційного формування.

**T. O. Psiarnetska, M. O. Tsysar, O. O. Lyeshchuk,
T. O. Kosenchuk, V. V. Ivzhenko, V. I. Shchidlovskyi**

Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine

MICROHARDNESS OF RINGS FROM CERAMIC MATERIALS BASED ON SiC AFTER INJECTION MOLDING

Examples of calculated distribution of temperature isolines in the workpiece formed in the mold for the manufacture of a ring of plastic ceramic material based on SiC are given. The procedure for preparing a specimen from the workpiece for microhardness testing is described. The indentation of specimen has been carried out and the injection imprints at different loading forces on the indenter were obtained. The dependence of microhardness on load force is defined. A 3D-map of the microhardness distribution along the plane of the axial section of the specimen was plotted.

Key words: injection molding, silicon carbide, computer modeling, indentation, microhardness.

**T. A. Псярнецкая, М. А. Цысарь, А. А. Лещук,
Т. А. Косенчук, В. В. Ивженко, В. И. Щидловский**

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины

МИКРОТВЕРДОСТЬ КОЛЬЦЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ SiC ПОСЛЕ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ

Приведены примеры рассчитанного распределения изолиний температуры в заготовке, которая формируется в пресс-форме для изготовления кольца из пластифицированного керамического материала на основе SiC. Описана процедура подготовки образца из заготовки для исследования на микротвердость. Проведено индентирование образца и получены изображения уколов при различных усилиях нагружения индентора. Установлена зависимость микротвердости от усилия нагружения. Построена 3D-карта распределения микротвердости по плоскости осевого сечения образца.

Ключевые слова: инжекционное литье, карбид кремния, компьютерное моделирование, индентирование, микротвердость.

Література

1. Lashway K. W., Storm R. S. Progress in ceramic component fabrication technology // AIAA Pap. – 1982. – 211. – P. 5.
2. Donald F., Heany, Cody G. Greene Effect of moulding parameters on final sintered component dimensions // Euro PM2004, Vienna, Austria, 17–21 October 2004. – 4. – P. 433–438.
3. Cerman R. M., Bose A. Injection Molding of Metals and Ceramics. – Princeton, PA. – 1997. – 413 p.
4. Третьяков Ю. Д. Керамика материал будущего. – М.: Знание, 1987. – 48 с.
5. Инжекционное формование порошков металлических и керамических материалов // Нихон киндзоку гаккай кайхо. Bull. Jap. Inst. Metals. – 1987. – 26, 3. – С. 473–480.

6. Исследование керамики // *Mol. Research Dev. Report.* – 1986. – № 2. – С. 41–57.
7. Лещук А. А., Цысарь Т. А., Ивженко В. В. Компьютерное моделирование процессов теплопереноса при инъекционном формовании изделий сложных форм // *Сверхтв. материалы.* – 2009. – № 2. – С. 34–43.
8. Псярнецька Т. О., Кіркова О. Г., Лещук О. О. та ін. Розробка технології інжекційного лиття керамічних виробів з використанням комп'ютерного моделювання // *Порошк. металургія.* – 2021. – № 3/4. – С. 28–44.
9. Хохлова Ю. А., Ищенко Д. А., Хохлов М. А. Индентирование от макро- до нанометрового уровня и примеры исследования свойств материалов с особой структурой // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* – 2017. – № 1. – С. 30–36.
10. ДСТУ ISO 6507-1:2007. Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Метод випробування. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2008. – 21 с.
11. ДСТУ 7809:2015. Прокат сортовий, калібрований із спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні вимоги. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 25 с.
12. ДСТУ 8429:2015. Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 20 с.
13. Григорьев В. К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
Надійшла 10.06.21

References

1. Lashway, K. W., & Storm, R. S. (1982). Progress in ceramic component fabrication technology. *AIAA Rar.*, 211, 5.
2. Heany, D. F., & Greene, C. G. (2004). Effect of moulding parameters on final sintered component dimensions. *Euro PM2004*, 4, 433 – 438.
3. Cerman, R. M., & Bose, A. (1997). *Injection molding of metals and ceramics*. Princeton, PA.
4. Tretyakov, Yu.D. (1987). *Keramika material budushchogo [Ceramics material of the future]*. Moscow: Znanie [in Russian].
5. Inzheksionnoe formovanie poroshkov metallicheskih i keramicheskikh materialov [Injection molding of powders of metal and ceramic materials] // *Nikhon kindzoku gakkay kaykho. (1987). Bull. Jap. Inst. Metals.*, 26, 3, 473–480 [in Russian].
6. Issledovanie keramiki [Study of ceramics]. (1986). *Mol. Research Dev. Report*, 2, 41–57.
7. Leshchuk, A. A., Tsysar, T. A., & Ivzhenko, V. V. (2009). Kompiuternoe modelirovanie protsessov teploperenosa pri inzheksionnom formovanii izdelii slozhnykh form [Computer modeling of heat transfer processes during injection molding of products of complex shapes] *Sverkhtverdye Materialy – Superhard Materials*, 2, 34–43 [in Russian].
8. Psiarnetska, T. O., Kirkova, O. G., Lyeshchuk, O. O., et al. (2021). Rozrobka tekhnolohii inzheksionnoho lyttia keramichnykh vyrobiv z vykorystanniam kompiuternoho modeliuвання [Development of the technology of the engineering literature of ceramic virobes from the vicars of the computer model] *Poroshkovaia Metallurgiiia – Powder metallurgy*, 3/4, 28–44 [in Ukrainian].
9. Khokhlova, Yu. A., Ishchenko, D. A., & Khokhlov, M. A. (2017). Indentirovanie ot makro- do nanometrovoho urovnia i primery issledovaniia svoistv materialov s osoboi strukturoi [Indentation from macro- to nanometer level and examples of studying the properties of materials with a special structure] *Tekhnicheskaiia diagnostika i nerazrushayushchii kontrol – Technical diagnostics and non-destructive testing*, 1, 30–36. [in Russian].

10. Materialy metalevi. Vyznachennia tverdosti za Vickersom. Chastyna 1. Metod vyprobuvannia [Metal materials. Determination of Vickers hardness. Test method]. (2008). *DSTU ISO 6507-1:2007*. Kyiv: DP UkrNDNTS [in Ukrainian].
11. Prokat sortovyi, kalibrovanyi iz spetsialnym obroblenniam poverkhni z vuhletsevoi yakisnoii konstruktsiinoi stali. Zahalni tekhnichni vimohi [Rolled high-quality, calibrated with a special surface treatment of high-quality carbon structural steel. General technical requirements]. (2016). *DSTU 7809:2015*. Kyiv: DP UkrNDNTS [in Ukrainian].
12. Prokat iz resorno-pruzhinnoi vuhletsevoi ta lehovanoi stali. Tekhnichni umovi [Rolled spring-loaded carbon and alloy steel. Specifications]. (2016). *DSTU 8429:2015*. Kyiv: DP UkrNDNTS [in Ukrainian].
13. Grigoryev, V. K. (1976). *Tverdost i mikrotverdost metallov [Hardness and microhardness of metals]*. Moscow: Nauka [in Russian].

УДК 621.891.923

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-407-417

В.Е. Бабич, канд. техн. наук^{1,2}

¹Физико-технический институт НАН Беларуси, 220141, г. Минск, ул. Купревича 10

²Университет гражданской защиты МЧС Беларуси,
220118, г. Минск ул. Машиностроителей 25, e-mail: babich83@tut.by

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН

Исследованы процессы резания бетона, железобетона и композиции материалов. Рассмотрены основные представления о процессах разрушения материалов при резании алмазным отрезным кругом. Определены нагрузки на алмазный отрезной круг, обеспечивающие максимальную производительность при резании бетона, железобетона и композиции, входящей в состав входной двери. Исследованы механизмы изнашивания алмазных зерен при равных нагрузках на алмазное зерно при резании различных материалов, позволяющие сделать выводы про кардинально отличные механизмы, происходящие в зоне резания.

Ключевые слова: алмазный сегментный круг, поверхности износа, резание бетона, резание композиции материалов.

Введение

Ежедневно спасатели выполняют операции по спасанию людей, используя при этом различный аварийно-спасательный инструмент. Наиболее распространенной операцией, выполняемой спасателями, является вскрытие входных дверей, представляющих собой комбинацию различных типов материалов. Нередки случаи, когда для деблокирования пострадавших необходима разборка завалов, сформированных в процессе разрушения строительных конструкций.

Основными аварийно-спасательными инструментами, используемыми спасателями, являются абразивно-отрезные устройства (бензорезы) (рис. 1). Рабочим органом абразивно-отрезного устройства выступает абразивный круг. Спасатели используют абразивные круги двух типов: круги отрезные на бакелитовой связке и круги алмазные отрезные. Как правило, отрезные круги на бакелитовой связке используются при резании изделий из металла. При этом данные типы кругов имеют ограниченный срок годности (6–36 месяцев), требуют особых условий хранения и эксплуатации (исключается попадание воды на поверхности круга и в зону резания). Алмазные отрезные круги применяются при резании бетона и