

2. Dobrzanski L. A., Bonek M., Hajduczek E. and Klimpel A. (2005): Alloying the X40CrMoV5-1 steel surface layer with tungsten carbide by the use of a high power diode laser. – Appl. Surf. Sci. - vol. 247, No. 1 – 4, pp. 328 – 332.

3. Кардаполова, М. А. Оптимизация трибологических характеристик покрытий на железной основе после лазерного модифицирования / М. А. Кардаполова, О. В. Дьяченко, Е.Э Фельдштейн // Машиностроение и техносфера XXI века: XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Донецк, 2006. – т. 2 – С. 104–107.

4. Дьяченко О. В., Кардаполова М. А., Серякова О. В. К определению влияния варьирования режимов лазерной обработки на трибологические характеристики режущего инструмента./ Дьяченко О. В., Кардаполова М. А., Серякова О.В/ Наука и техника. 2016;15(5):415–419.

5. Трение, изнашивание и смазка. Справочник В 2 кн. Кн. 2. Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. – М. Машиностроение. – 1979. – 358 с.

6. А. Ф. Аксенов Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. М.: Машиностроение, – 1977. – 152 с.

7. Особенности влияния лазерной обработки на свойства композиционных покрытий системы Fe–Cr–B–Si / М. А. Кардаполова М. А., О. В. Дьяченко, Ю. О. Девойно, А. Г. Василенко // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь – Донецк. – 2005. – Т. 2 – С. 63–66.

8. E. Feldshtein, M. A. Kardapolova, O. Dyachenko, Int. J. Surf. Sci. Eng. 9 (5) (2015) 395–406.

*Поступила 02.12.2021*

**УДК 621.78; 621.179.2**

**Кане М. М., Крайко С. Э., Раманович А. А.**

## **ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫРУБНЫХ ШТАМПОВ**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*В статье показана актуальность лазерного упрочнения рабочих поверхностей вырубных штампов и исследований технологических возможностей указанного процесса для различных условий его реализации и характеристик упрочненных поверхностей. К матрицам и пуансонам вырубных штампов помимо требований к их прочности на изгиб, на разрыв и на срез предъявляются требования износостойкости, твердости поверхностей рабочих элементов штампов, при лазерном упрочнении и уменьшением шероховатости поверхностей. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния плотности энергии лазерного излучения  $q$ , Дж/мм<sup>2</sup>, толщины  $t$ , мкм светопоглощающего покрытия, наносимого на упрочняемые поверхности перед их лазерным упрочнением, и коэффициента перекрытия  $K_{пер}$  лазерных дорожек, на параметр шероховатости  $R_a$ , мкм упрочненной поверхности.*

**Состояние вопроса, задачи исследования.** Стоимость инструментальной оснастки составляет до 20 % от себестоимости продукции штамповки. Причем выход из строя инструментальной оснастки при штамповке из-за ее износа достигает 20 % [1].

Вырубные штампы широко используются при изготовлении различных изделий машино- и приборостроения из листового материала. В общем количестве штамповой оснастки доля вырубных и пробивных штампов составляет 70–90 %. При этом на долю стальных штампов в различных отраслях промышленности (в отличие от твердосплавных) приходится 90–95 %. Например, в ЗАО «АТЛАНТ», г. Минск при изготовлении холодильников используются около 100 наименований вырубных штампов. При средней

стоимости таких штампов около 60 тыс. бел. руб., средней стойкости штампа до переточки 20 тыс. деталей, общего числа переточек штампа – 10, годовой программе выпуска деталей каждого наименования около 600 тыс. штук – годовые расходы на данную оснастку для предприятия составляют около 1,8 млн. бел. руб. Как показывают результаты выполненных ранее исследований [2; 3; 4], современные методы упрочнения инструментальных сталей позволяют увеличить стойкость инструмента от 3 до 7 раз. При увеличении стойкости штампов в 3 раза ЗАО «АТЛАНТ» может получить экономию расходов на их изготовление около 0,6 млн. бел. руб. в год.

Существует много методов поверхностного упрочнения деталей машин. Преимуществами лазерного упрочнения являются отсутствие деформаций поверхности и необходимости ее последующей обработки, минимальные расход энергии, себестоимость процесса упрочнения и воздействие его на окружающую среду. Этим объясняется большое внимание исследователей и работников промышленности к изучению и применению лазерного упрочнения деталей машин.

Особенностями выполненных исследований лазерного упрочнения штамповой оснастки является их ориентация на прочностные свойства упрочненных поверхностей. Недостаточно изучено влияние на характеристики упрочненных поверхностей таких условий лазерного упрочнения как отражательная способность упрочняемой поверхности и степень перекрытия лазерных дорожек при многопроходном упрочнении поверхности.

С учетом сказанного были поставлены следующие задачи исследования.

1. Разработать методику и выбрать условия экспериментального исследования влияния плотности энергии лазерного излучения  $q$ , Дж/мм<sup>2</sup>, толщины  $t$ , мкм светопоглощающего покрытия, наносимого на упрочняемые поверхности перед их лазерным упрочнением, и коэффициента перекрытия  $K_{пер}$  лазерных дорожек, наносимых на упрочняемую поверхность, на параметр шероховатости  $R_a$ , мкм упрочненной поверхности.

2. Установить характер влияния выбранных факторов на параметр  $R_a$  упрочненных образцов из штамповой стали.

3. Установить возможность моделирования зависимости  $R_a = f(q, t, K_{пер})$  статистическими методами.

4. Разработать предварительные рекомендации по выбору указанных условий лазерного упрочнения штамповых сталей для минимизации значений  $R_a$ .

**Методика исследования, применяемые материалы и оборудование.** Рабочие детали штампов (пуансоны и матрицы) подвергаются ударной нагрузке и износу. Поэтому к материалу пуансонов и матриц предъявляются требования высокой твердости и износостойкости поверхности при вязкости сердцевины.

Для изготовления рабочих частей штампов для холодной листовой штамповки применяют углеродистые инструментальные стали небольшой прокаливаемости У18А, У10А, У8, У10; легированные стали повышенной прокаливаемости ШХ15, Х09, 9Х, 9ХС, ХВГ, 9ХВГ и др.; высокохромистые стали с высокими значениями прокаливаемости и износостойкости, мало деформируемые при закалке Х12Ф1, Х12Ф, Х12М, ХГ3СВФ и др.; легированные стали повышенной вязкости (при твердости 56–58 HRC) 4ХС, 6ХС, 5ХВГ и др.

Сталь Х12М имеет несколько более высокую твердость после закалки (58–60 HRC), большую износостойкость и широко используется для изготовления рабочих частей вырубных штампов [1]. Поэтому она была выбрана в данной работе для исследования.

Для лазерного упрочнения поверхностей металлических изделий используют технологические лазеры импульсного и непрерывного действия. Как показывает опыт исследований и практического применения технологий лазерного упрочнения металлических деталей [2; 3; 4], импульсные лазеры позволяют повысить точность расположения зон лазерной термообработки (ЛТО) на упрочняемой поверхности; получить строку на упрочняемой поверхности из зон ЛТО, отстоящих на некотором расстоянии друг от

друга; увеличить степень поглощения лазерного излучения упрочняемой поверхностью за счет уменьшения длины волны излучаемого потока энергии; уменьшить объем металла, испаренного под действием лазерного излучения. Первая из перечисленных особенностей применения лазеров импульсного действия особенно важна при упрочнении режущего и штампового инструмента, где необходимо упрочнить ограниченные области режущих кромок инструмента. Вторая особенность позволяет уменьшить износ упрочняемой поверхности в 2–3 раза за счет наличия неупрочненных зон между упрочненными участками поверхности [3]. Третья особенность связана с тем, что импульсные, особенно твердотельные (ТТ) лазеры, работают с меньшей длиной волны, чем лазеры непрерывного действия. Если ТТ импульсные лазеры работают в области видимого диапазона светового спектра (длина волны  $\lambda = 0,38 \dots 0,76$  мкм), то газовые лазеры непрерывного действия излучают в основном в инфракрасном диапазоне с длиной волны  $\lambda = 9,4 \dots 10,6$  мкм. Доказано, что поглощательная способность упрочняемой поверхности увеличивается с уменьшением длины волны лазерного излучения. При лазерном упрочнении металлов рекомендуется работать с излучением в видимой области спектра. Современные лазеры излучают с длиной волны менее 0,1 мкм. Это позволяет отказаться от светопоглощающего покрытия, повысить КПД и эффективность лазерного упрочнения. Четвертая особенность лазеров с импульсным излучением связана с тем, что с уменьшением длительности импульса излучения уменьшается масса испаряемого металла под действием одного импульса. Как правило, твердотельные импульсные лазеры работают с продолжительностью импульса  $\tau = 10^{-2} \dots 10^{-12}$  с. Но существуют методы, позволяющие уменьшить  $\tau$  до  $10^{-18}$  с. Это значительно меньше, чем у лазеров непрерывного действия. Эта особенность ТТ лазеров импульсного действия позволяет существенно увеличить их КПД ( $> 20\%$ ) [3].

С учетом сказанного для выполнения исследования был выбран твердотельный лазер импульсного действия «Квант-18М», имеющий плотность энергии  $q$  в пределах от 5 Дж/мм<sup>2</sup> (начало эффекта закалки упрочняемой поверхности) до 25 Дж/мм<sup>2</sup> (начало оплавления поверхности). Испытания проводились при значениях  $q = 10 \dots 13$  Дж/мм<sup>2</sup>, исключая оплавление упрочняемой поверхности.

Поскольку ширина рабочих поверхностей вырубных штампов составляет 10–200 мм, а диаметр лазерного луча обычно составляет 2–5 мм, было принято решение производить лазерное упрочнение строчками с коэффициентом перекрытия  $K_{пер.} = 0,1 \dots 1$ . Коэффициент перекрытия  $K_{пер.} = S/D$ , где  $S$  – шаг строчек упрочнения,  $D$  – диаметр лазерного луча. В выполненных исследованиях  $D = 2$  мм.

Шлифованные металлические поверхности отражают до 90 % лазерного излучения. Снижение отражающей способности поверхности и, следовательно, повышение эффективности лазерного упрочнения обеспечивается увеличением шероховатости поверхности или нанесением светопоглощающих покрытий. Первый путь для нас был неприемлем, т. к. для повышения износостойкости рабочих поверхностей штампов их шероховатость должна быть не менее 0,8 мкм [1]. В качестве светопоглощающих покрытий обычно используют сульфидные ( $Fe_2S_3$ ), оксидные, фосфатные ( $Mg_3(PO_4)_2$ ,  $Zn_3(PO_4)_2$ ) неметаллические пленки. В нашем исследовании для увеличения светопоглощения на поверхности образцов наносился слой краски различной толщины ( $t = 5 \dots 15$  мкм) с наполнителем из оксидов металлов. Толщина покрытия измерялась прибором В7-517.

Лазерная термообработка поверхностей может производиться с оплавлением и без оплавления поверхностного слоя. В работе [2] показано, что лазерную обработку закаленных быстрорежущих и высокохромистых штамповых сталей следует проводить без оплавления, но при нагреве поверхности до температуры, близкой к температуре плавления металла. Это позволит обеспечить рост микротвердости и улучшение структуры поверхностного слоя. Отсутствие оплавления поверхности необходимо также для сохранения или снижения ее шероховатости, т. к. лазерная ТО при упрочнении инструментов

и штампов является финишной операцией их обработки. Поэтому мы проводили лазерное упрочнение образцов без оплавления их поверхностей. Управление режимом оплавления упрочняемых поверхностей в выполненных нами исследованиях производилось путем регулирования плотности энергии  $q$  лазерного излучения. В проведенных опытах  $q$  изменялась от 10 до 13 Дж/мм<sup>2</sup>.

В выполненном исследовании была принята скорость линейного перемещения лазерного луча 50 мм/с.

**Обработка результатов экспериментальных исследований.** Для повышения эффективности экспериментального исследования влияния условий лазерной термообработки стали X12M (изучалось влияние  $q$ ,  $t$  и  $K_{пер.}$ ) на параметр  $R_a$  упрочненной поверхности нами была использована методика полного факторного эксперимента. Для получения возможности более объективной оценки характера парных взаимосвязей указанных факторов с параметром  $R_a$  по графикам, построенным не по 2-м, а по 3-м точкам, в стандартную матрицу планирования эксперимента для 3-х факторов были добавлены опыты в центре плана для каждого фактора. При этом значения остальных факторов принимались на верхнем уровне. Было принято однократное дублирование всех опытов. Принятая матрица планирования эксперимента приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	$q$ ( $x_1$ )	$t$ ( $x_2$ )	$K_{пер.}$ ( $x_3$ )	$R_{a1}$ ( $y_1$ )	$R_{a2}$ ( $y_2$ )	$R_{a\text{ ср}}$ ( $y_{ср}$ )
1	–	–	–	$y_{11}$	$y_{21}$	$y_{1ср}$
2	+	–	–	$y_{12}$	$y_{22}$	$y_{2ср}$
3	–	+	–	$y_{13}$	$y_{23}$	$y_{3ср}$
4	+	+	–	$y_{14}$	$y_{24}$	$y_{4ср}$
5	–	–	+	$y_{15}$	$y_{25}$	$y_{5ср}$
6	+	–	+	$y_{16}$	$y_{26}$	$y_{6ср}$
7	–	+	+	$y_{17}$	$y_{27}$	$y_{7ср}$
8	+	+	+	$y_{18}$	$y_{28}$	$y_{8ср}$
9	0	+	+	$y_{19}$	$y_{29}$	$y_{9ср}$
10	+	0	+	$y_{110}$	$y_{210}$	$y_{10ср}$
11	+	+	0	$y_{111}$	$y_{211}$	$y_{11ср}$

Примечание. Индекс «ср» приведен для средних арифметических значений параметра  $R_a$  в 2-х параллельных опытах.

Максимальные (+) и минимальные (–) значения рассмотренных факторов, принятые в выполненных опытах, приведены в табл. 2

Таблица 2 – Исходные данные для планирования эксперимента.

Входные параметры	$q$	$t$	$K_{пер.}$
Размерность	Дж/мм <sup>2</sup>	мкм	
Кодовое значение	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$x_{max}$	13	15	1
$x_{min}$	10	5	0,1
$x_{осн}$	11,5	10	0,55
$\Delta x$	1,5	5	0,45

В качестве математической модели рассматриваемых зависимостей с учетом ранее выполненных исследований в данной области [2; 5; 6] и ожидаемых линейных зависимостей между изучаемыми факторами нами был принят полином первой степени с учетом эффектов парных взаимодействий изучаемых факторов. Как показывает опыт применения методов планирования экспериментов в технологических задачах, такая модель позволяет более точно описать изучаемые процессы.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (1)$$

Здесь  $y$ -значение  $R_a$ ;  $x_1, x_2, x_3$  – значения соответственно  $q, t, K_{пер}$  в относительных единицах ( $\pm 1$ ).

Расчет коэффициентов указанной зависимости был выполнен по известным зависимостям [7]. Оценка достоверности указанных коэффициентов регрессии производилась с помощью  $t$ -критерия Стьюдента, адекватность найденных зависимостей – с помощью  $F$ -критерия Фишера [7].

**Результаты исследования, их анализ.** В табл. 3 приведены основные результаты, а на рис. 1–3 – их графическое представление.

Таблица 3 – Основные результаты эксперимента

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_{ср}$
1	–	–	–	0,378	0,363	0,371
2	+	–	–	1,34	1,41	1,375
3	–	+	–	0,836	0,897	0,867
4	+	+	–	1,10	1,03	1,065
5	–	–	+	2,10	2,27	2,185
6	+	–	+	0,591	0,537	0,567
7	–	+	+	0,221	0,241	0,231
8	+	+	+	2,09	1,91	2
9	0	+	+	0,801	0,756	0,778
10	+	0	+	0,724	0,762	0,743
11	+	+	0	0,33	0,37	0,35

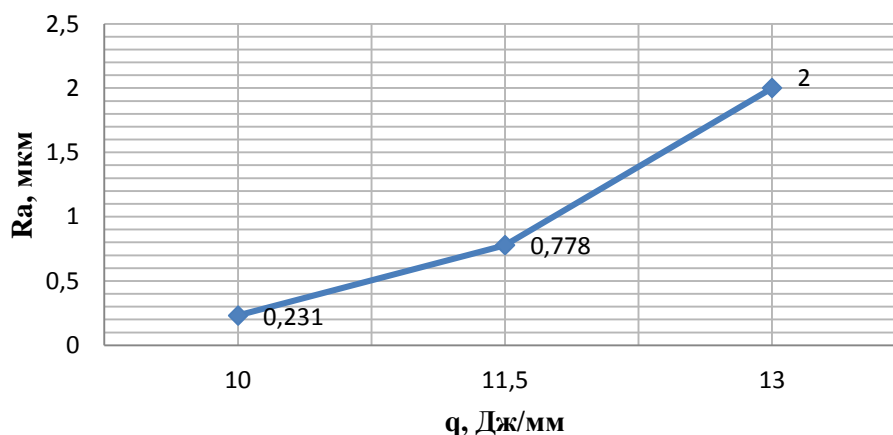


Рис. 1. График зависимости  $R_a = f(q)$

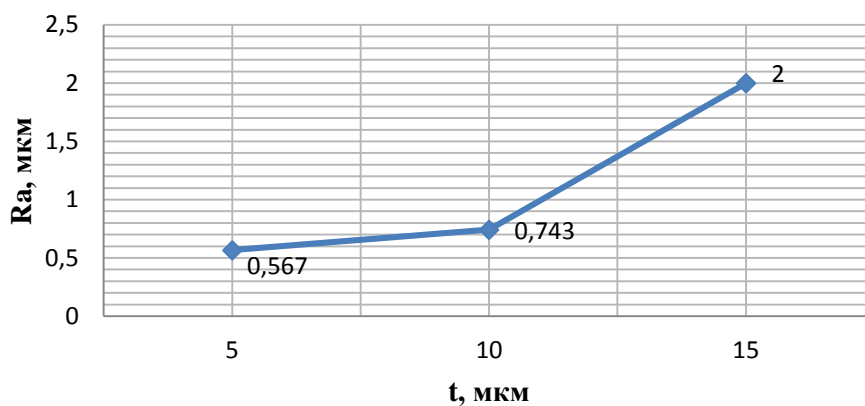


Рис. 2. График зависимости  $R_a = f(t)$

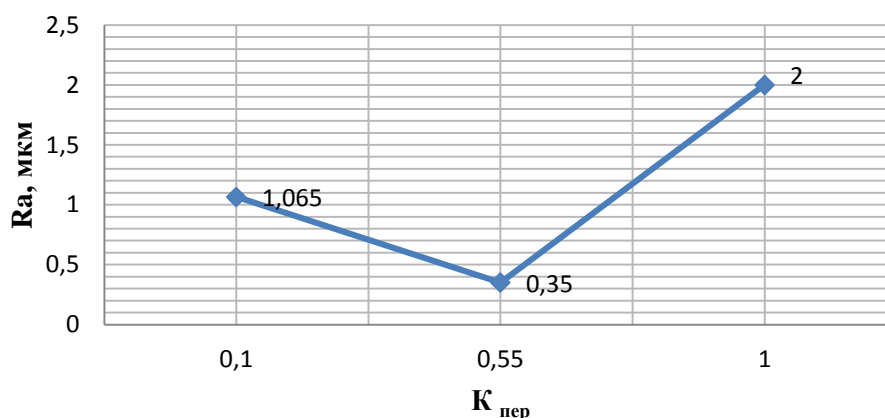


Рис. 3. График зависимости  $R_a = f(K_{пер.})$

Как видно из приведенных данных, с увеличением значений рассмотренных характеристик лазерной ТО  $q$ ,  $t$  и  $K_{пер.}$  имеет место рост значений  $R_a$ . Это объясняется увеличением количества энергии (теплоты), передаваемой лазерным лучом упрочняемой поверхности с увеличением плотности энергии луча, с уменьшением отражающей способности светопоглощающего покрытия при увеличении его толщины, с уменьшением степени отпуска упрочняемой поверхности при увеличении коэффициента перекрытия дорожек лазерного нагрева поверхности.

Для лазерной термообработки (ТО) характерны высокая скорость нагрева  $10^5$ – $10^6$  град/с и малое время воздействия лазерного луча на поверхность (до 0,1 с). Этим объясняется практическое отсутствие деформации упрочняемой детали после лазерной ТО, что позволяет использовать ее для финишной обработки изделий. Однако, как показывают наши результаты, теплофизические процессы, происходящие при лазерной ТО, вызывают некоторые изменения высотных характеристик микронеровностей упрочняемых поверхностей металлических изделий даже при отсутствии их оплавления.

Как видно из рис. 1–3, зависимости  $R_a$  от  $q$  и  $t$  близки к линейной. Зависимость  $R_a$  от  $K_{пер.}$  ближе к параболе второго порядка, однако, и для нее характерна тенденция увеличения  $R_a$  с ростом  $K_{пер.}$ , особенно для значений  $K_{пер.} > 0,55$ .

В табл. 4 приведены значения коэффициентов уравнения (1) и  $t$ -критериев Стьюдента для оценки их достоверности, полученные при обработке результатов выполненного эксперимента.

Таблица 4 – Результаты расчетов коэффициентов уравнения (1) и t-критериев оценки их достоверности

Обозначения коэффициентов	Значения коэффициентов	Обозначения t-критериев	Значения t-критериев
$b_0$	1,083	–	–
$b_1$	0,169	$t_1$	9,66
$b_2$	–0,042	$t_2$	2,39
$b_3$	0,163	$t_3$	9,32
$b_{12}$	0,323	$t_{12}$	18,43
$b_{13}$	–0,131	$t_{13}$	7,5
$b_{23}$	–0,088	$t_{23}$	3,4

Критическим значением t-критерия для условий данного эксперимента является  $t_{\alpha,f} = t_{0,05,16} = 1,75$  (здесь  $\alpha$  – принятый уровень значимости;  $f$  – число степеней свободы,  $f = nN = 2 \cdot 8 = 16$ ;  $n$  – число параллельных опытов;  $N$  – число опытов по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ)). Т. к. для всех коэффициентов уравнения (1) выполняется условие  $t > t_{кр}$ , значения и знаки этих коэффициентов являются достоверными.

Для оценки адекватности полученной зависимости (1) экспериментальным данным было рассчитано значение F-критерия Фишера [7]. Его величина оказалось равной  $F_p = 3,21$ . Критическое значение F-критерия для условий эксперимента равно  $F_{кр} = F_{\alpha,f_1,f_2} = F_{0,05,1,8} = 5,3$  (здесь  $\alpha$  – принятый уровень значимости,  $f_1 = N - q = 8 - 7 = 1$ ,  $f_2 = N = 8$ ,  $N$  – число опытов по схеме ПФЭ,  $q$  – число коэффициентов уравнения регрессии). Т. к. условие  $F_p < F_{кр}$  ( $3,21 < 5,3$ ) соблюдено, полученная зависимость (1) адекватна экспериментальным данным.

Расчет коэффициентов уравнения (1) для натуральных значений исследованных факторов  $q$ ,  $t$ ,  $K_{пер}$  выполнен по методике, приведенной в [7]. Была получена следующая зависимость:

$$R_a = 5,25 - 0,437q - 0,482t - 1,47K_{пер} + 0,044qt + 0,195qK_{пер} - 0,04tK_{пер}. \quad (2)$$

Зависимость (2) может быть использована для моделирования и оптимизации изучаемого процесса лазерной ТО штамповых сталей.

### Выводы.

1. Установлена зависимость параметра шероховатости  $R_a$  упрочненной лазером поверхности образцов из штамповой стали от исследуемых факторов (удельной энергии лазерного луча  $q$  (Дж/мм<sup>2</sup>), толщины светопоглощающего покрытия упрочняемой поверхности  $t$  (мкм), степени перекрытия  $K_{пер}$  лазерных дорожек при упрочнении поверхности), предложена ее физическая интерпретация ( $F_p < F_{кр}$  ( $3,21 < 5,3$ )).

2. Получена математическая модель указанных взаимосвязей  $R_a = f(q, t, K_{пер})$  и показана достоверность коэффициентов регрессии, входящих в указанную модель.

3. На основании графических представлений парных взаимосвязей  $R_a$  с рассмотренными факторами получены рекомендации по назначению условий лазерного упрочнения, обеспечивающих требуемое значение параметров шероховатости  $R_a$ . Рекомендуются следующие условия лазерного упрочнения:  $q = 10 \dots 11,5$  Дж/мм<sup>2</sup>,  $t = 5 \dots 10$  мкм,  $K_{пер} = 0,3 \dots 0,7$ . Эти условия выбраны с учетом имеющихся рекомендаций по требованиям к шероховатости рабочих поверхностей вырубных штампов в пределах  $R_a = 0,4 \dots 0,8$  мкм [1; 5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка металлов давлением в машиностроении /П. И. Полухин [и др.]. – М. Машиностроение, 1983. – 273 с.
2. Астапчик С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке/ С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск, Белорус. Наука, 2008. – 251 с.
3. Коваленко, В. С. Лазерная технология. – Киев: Высш. шк., 1989. – 280 с.
4. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн.6. Основы лазерного упрочнения сплавов/ Под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 159 с.
5. Лисовский, А. Л. Лазерное упрочнение штампового инструмента/А. Л. Лисовский, И. В. Плетнёв. – Могилёв // Вестник Белорусско-Российского университета, 2008, №3 (20). – С. 90–94.
6. Голубев, В. С. Лазерная поверхностная обработка материалов и пути повышения ее эффективности / В. С. Голубев, В. И. Гуринович И. А. Романчук. – Минск //Вестник Физико-Технического института НАНБ. – №5. – 2017.
7. Кане М.М Основы исследований, изобретательства и инновационной деятельности в машиностроении: учебник / М. М. Кане. – Минск, Высшэйшая школа, 2018. – 366 с.

Поступила 05.01.2022

УДК 621.762:621.921

Сенють В. Т., Парницкий А. М., Валькович И. В., Жорник В. И.

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО BN, СИНТЕЗИРОВАННОГО ИЗ ВЮРЦИТНОГОВN С ДОБАВКАМИ АЛЮМИНИЯ

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь*

*Разработана математическая модель технологического процесса синтеза в условиях высоких давлений и температур поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора (сBN). Сверхтвердый материал получен на основе порошка вюрцитного BN (wBN), модифицированного алюминием, являющимся инициатором процесса фазового превращения wBN→сBN. В результате моделирования рассчитаны граничные P, T-параметры синтеза сверхтвердого материала и необходимое количество добавки алюминия. Установлено, что синтез материала с твердостью на уровне 28–30 ГПа необходимо осуществлять в диапазоне давлений 5–7 ГПа при температурах 2100–2250 °С, а содержание добавки алюминия должно составлять 7,5–10,0 мас. %.*

**Введение.** Синтез поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (сBN) с заданными структурно-фазовым составом и физико-механическими характеристиками является важной задачей инструментального производства. Известно, что ПСТМ из кубического BN, как правило, получают либо спеканием порошков сBN и композиций на их основе, либо за счет фазового превращения графитоподобного/вюрцитного BN в условиях высоких давлений и температур [1].

Поликристаллические сверхтвердые материалы на основе вюрцитного нитрида бора (wBN), известные под марками «гексанит-Р» (композит-10), ПТНБ (композит-09), «вюрцин», «вюрбон» и др., получают методом горячего прессования порошка wBN в условиях высоких давлений и температур, при которых происходит частичное или полное превращение wBN в кубический нитрид бора (сBN). Отличительной особенностью ПСТМ на основе wBN является их мелкозернистая (нанодисперсная) структура, дающая возможность эксплуатировать данный материал при значительных ударных нагрузках [2].