

Таблица 4. Результаты испытаний цилиндрических пуансонов

№ группы	Пуансоны с покрытием ZrCN-DLC	Контрольные образцы (без покрытия)			
		X12M	Sverker 21	X12M	Sverker 21
		Количество пробивок			
1	$P(C_2H_2) = 0,75 \times 10^{-2}$ Па	6100	7700	2300	2800
2	$P(C_2H_2) = 1,50 \times 10^{-2}$ Па	8920	10600		

**Заключение.** Разработан тонкопленочный композиционный материал, представляющий собой нанокристаллический карбонитрид циркония и аморфный алмазоподобный углерод для вырубных пуансонов, способный эффективно противостоять трещинообразованию и усталостному износу в условиях ударных нагрузок.

Определены условия формирования монофазного материала системы Zr-C-N в виде  $\delta$ -фазы, имеющей гранецентрированную решетку типа NaCl, формирующейся по типу твердого раствора замещения с преимущественной ориентацией (111). Покрытия характеризуются мелкодисперсной структурой с размерами зерен 5–8 нм. Показано, что при одновременном осаждении из смешанных потоков плазмы циркония и углеродной плазмы избыток углерода для кристаллитов ZrCN формирует аморфную матрицу с наличием гибридных  $sp^3$  связей, характерных для структуры алмаза. Алмазоподобный углерод стабилизирует ультрадисперсную структуру  $\delta$ -фазы ZrCN, обеспечивает высокую твердость, хорошие триболо-

гические характеристики, препятствует коалесценции зерен кристаллитов и зернограничной диффузии кислорода при эксплуатации покрытий в условиях высоких нагрузок и температур.

Испытания пуансонов из стали X12M и Sverker 21 с нанесенными покрытиями показали в условиях реального производства увеличение срока эксплуатации штампового инструмента до 3,8 раза.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abadias, G. Stress and preferred orientation in nitride-based PVD coatings // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 2223–2235.
2. Binder, S. Phase equilibria in the systems Ti-C-N, Zr-C-N and Hf-C-N / S. Binder, W. Lengauer, P. Eitlmayer, J. Bauer, J. Debuigne, M. Bohn // Journal of Alloys and Compounds. – Vol. 217. – Issue 1. – P. 128–136.
3. Zocco, A. Mechanical and tribological properties of CNx films deposited by reactive laser ablation / A. Zocco, A. Perrone, E. Broitman, Z. Czigan, L. Hultman, M. Anderle // Diam. Relat. Mater. – 2002. – Vol. 11. – P. 98–104.
4. Chekan, N.M. New Technique of DLC Coating Obtaining for Tribology Applications / N.M.Chekan, V.V. Akulich, E.V. Ladutko, Y. Zhuang, I.P. Akula // Advanced Tribology. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. – P. 722–723.
5. Neuville, S. Quantum electronic mechanisms of atomic rearrangement during growth of hard carbon films // Surface and Coatings Technol. – 2011. – Vol. 206. – P. 703–726.

Материал поступил в редакцию 18.11.14

## ONYSKO S.R., HVISEVICH V. M., CHEKAN N. M., SHARK I.P., VASILEVICH I.B. Nanocrystal coverings of the stamping elements of equipment

A composition coatings onto blanking punches based on nanocrystal zirconium carbonitride and amorphous diamond-like carbon have been developed. The thin film material was obtained from the mixed flows of pulsed carbon plasma and DC zirconium plasma. The coating structure consists of  $\delta$ -phase of  $Zr(C_xN_{1-x})_{1-y}$  having crystallites in size of 5–8 nm embedded in the amorphous carbon matrix. Factory testing of the coated blanking punches demonstrated the increase of the average service life of the punches as much as 3.2 times.

УДК 628.544

Петров О.А., Романовский В.И.

## МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СВЕРХКАВИТИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

**Введение.** Разрушение твердых материалов относится к числу основных задач большинства промышленных производств и касается практически всех сфер жизнедеятельности человека, одним из решений которой является измельчение и диспергирование твердых материалов, находящихся в жидкой среде.

Согласно Международной патентной классификации (МПК), сельское хозяйство является классом «A01» в мировой иерархии первого раздела удовлетворения жизненных потребностей человека. То есть, именно этот аспект жизнедеятельности предполагает освоение и реализацию совокупности решений специфических комплексных задач, в основе которых заложен базовый вектор в развитии мировой науки, технологии и техники. Следовательно, один из главных акцентов в его усовершенствовании и активном продвижении должен быть сосредоточен как раз в этом направлении.

По утверждениям Международной продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО) ситуация на планете является практически чрезвычайной. Для нашего государства эта проблема, конечно, не стоит сейчас так остро. Однако, руководствуясь перечнем приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, согласно Постановлению Совета Министров № 585 от 19.04.2010 п. 9.5 «Технологии и методы совершенствования породного состава, содержания, кормления, воспроизводства, ветеринарной защиты и целевого использования сельскохозяйственных жи-

вотных», этот пункт является одним из ключевых условий ускоренного развития агропромышленного комплекса страны.

То есть, любое разумное, перспективное предложение в данном русле является актуальным, не только в рамках развития нашей страны, но и целенаправленно в мировом масштабе. Так, успешное выращивание молодняка крупного рогатого скота (КРС) требует получения и использования кормов, плюс комплексная механизация и автоматизация связанных с этим технологических процессов.

Одним из путей интенсификации приготвления суспензий является применение новых нетрадиционных аппаратов для получения твердых материалов, основанных на физических эффектах, таких как электрический разряд, ультразвук, гидродинамическая кавитация и т.д. Все эти процессы так или иначе связаны с явлением кавитации.

На кафедре машин и аппаратов химических и силикатных производств Белорусского государственного технологического университета была создана и испытана установка с применением статического гидродинамического сверхкавитирующего аппарата для получения суспензий и эмульсий, соответствующих необходимым требованиям.

**Цель работы** – разработать методику расчета гидродинамических сверхкавитирующих аппаратов.

**Методику разработки** гидродинамических сверхкавитирующих аппаратов рассмотрим на примере использования двух типов кавитаторов [1–4]: первый представляет собой металлические пластинки

Петров О.А., доцент Белорусского государственного технологического университета.

Романовский В.И., ассистент Белорусского государственного технологического университета.

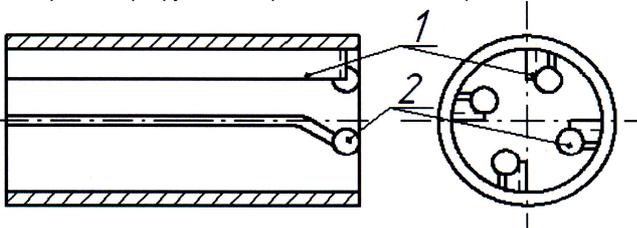
Беларусь, БГТУ, 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

с обтекателями в виде сфер, второй – кавитатор в виде сопла Вентури с коническим обтекателем (струйный кавитатор).

Установка представляла собой замкнутый циркуляционный контур. На вертикальном участке нагнетательного трубопровода после насоса был установлен пластинчатый кавитатор (рис. 1).

Аппарат выполнен в виде продольных радиальных пластин 1, с отогнутыми концами. Эти отогнутые концы пластин-лопастей подкручивают поток и одновременно выполняют функции кавитационной решётки. Для создания развитого кавитационного течения на концах пластин устанавливаются обтекатели 2 в виде сфер.

Как показывают результаты исследований [1–5], при имеющемся режиме течения жидкости одного гидродинамического воздействия может оказаться недостаточно для измельчения требуемых материалов (например, зернобобовых культур), т.е. требуется дополнительное механическое воздействие. Поэтому непосредственно контактирующие с материалом кромки пластин следует выполнять заостренными. Перед закруткой суспензия проходит через прямые участки лопастей, где при контакте с режущими кромками происходит первичное разрушение обрабатываемого материала.



1 – пластина; 2 – обтекатель  
Рис. 1. Схема пластинчатого кавитатора

Далее частицы попадают в поле кавитационного воздействия с дополнительной закруткой потока, и происходит их доизмельчение.

Оптимальные параметры работы пластинчатого кавитатора происходят при загромождении потока  $\bar{S} = 0,2 \div 0,3$ . Исходя из этого, рассчитываем диаметр обтекателей  $d_0$ , м:

$$d_0 = \gamma \frac{d_u}{4} \cdot \sqrt{\bar{S} + 1},$$

где  $d_u$  – установочный диаметр трубопровода, м;

$\gamma$  – поправочный коэффициент ( $\gamma = 0,7$ ).

Т. о. диаметр каждого обтекателя  $d_0 = 0,012$  м.

Требуемые размеры трубопровода за кавитатором рассчитываются интегрированием системы дифференциальных уравнений, с учетом длины пробега кавитационных пузырьков

$$\begin{cases} d_k = 2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left( \sqrt{\frac{4\pi \cdot r \cdot \sigma}{\rho \cdot Q} \cdot \frac{dz}{dt} + 2 \frac{p_2 - p_k}{\rho} - 2 \frac{v_c^2}{r} \cdot dr} \right) dt \\ L_k = \int_{t_1}^{t_2} \frac{4Q}{\pi \cdot (D^2 - 4r^2)} dt \end{cases}$$

Длины трубопровода за кавитатором достаточно для избежания кавитационной эрозии. Для предотвращения контакта коллапсирующих кавитационных пузырьков с внутренней поверхностью трубопровода, минимальное расстояние от стенки до обтекателя  $a$ . Межцентровое расстояние для смежных обтекателей, м

$$l_0 = d_u - 2a - d_0.$$

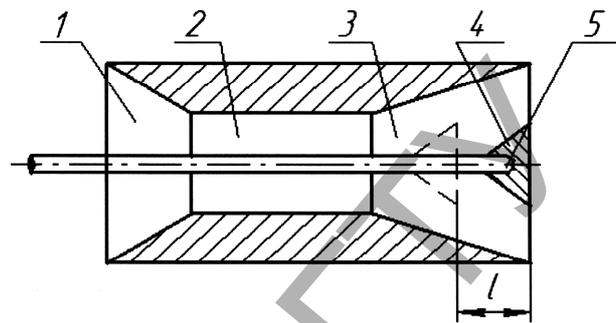
Предпочтительная длина пластин для достижения максимального механического воздействия  $L_l = 2 \div 4 d_u$ .

Высота пластины в сечении корпуса кавитатора по центрам обтекателей –  $H_l$ , м:

$$H_l = \frac{\pi}{8} \cdot d_u \cdot \cos\left(\frac{3}{8}\pi\right) + (a + 0,5d_0) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right).$$

Рекомендуемый угол закрутки  $\beta = 30^\circ$ .

В качестве второго варианта рассмотрим кавитатор в виде сопла Вентури с коническим обтекателем (струйный кавитатор), аналогичной известной конструкции приведенной на рис. 2, расположенный на горизонтальном участке установки за завихрителем.



1 – конфузор; 2 – цилиндрическая часть сопла Вентури; 3 – диффузор; 4 – конус-обтекатель; 5 – шток  
Рис. 2. Схема струйного кавитатора

Кавитатор включает сопло Вентури, состоящее из конфузора 1, проточной цилиндрической части 2, диффузора 3. В диффузоре установлен конус-обтекатель 4, укрепленный на штоке 5.

Исходя из имеющихся экспериментальных и теоретических результатов [1–5], а также на основании конструктивных особенностей, приведем методику определения размеров струйного кавитатора, при использовании следующих исходных данных:

Для насоса марки К (М) 100-65-250:

- оптимальная подача  $Q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $0,028 \text{ м}^3/\text{с}$ );
- оптимальный напор  $H = 80$  м;
- диаметр нагнетательного трубопровода  $d_u = 0,065$  м.

Среднерасходная по сечению трубопровода скорость потока  $v = Q/S = 8,37$  м/с.

Максимально необходимую скорость для создания режима развитой кавитации за обтекателем исходя из максимального эффекта обработки можем определить при помощи экспоненциальной зависимости

$$A = a_1 + b_1 \cdot e^{-k \cdot v},$$

где  $A$  – степень обработки материала;

$a_1, b_1$  – коэффициенты, учитывающие начальную степень обработки и эффективность кавитатора;

$k$  – поправочный коэффициент (для струйного кавитатора  $k = 0,6$ ).

Расчеты показали, что степень обработки материала стабилизируется (не превышает 5%) при скорости в узком сечении сопла  $v_c = 9 \div 11$  м/с, поэтому диаметр цилиндрической части

$$d_0 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}.$$

Однако при таком диаметре максимальная толщина стенки сопла не превышает 3,5 мм, поэтому целесообразно ее увеличить. Окончательно принимаем  $d_0 = 0,056$  м (при этом максимальная скорость  $v_c = 11,4$  м/с является допустимой).

Длина конфузора  $L_k = (0,8 \div 1,4) d_u = 0,07$  м.

Длина диффузора  $L_d \geq 2d_0$ ;  $L_d = 0,12$  м.

Длина цилиндрического участка  $L_c = (L_k + L_d) / 2 = 0,095$  м.

Общая длина сопла – 0,285 м.

Размеры обтекателя подбираем в зависимости от величины загромождения потока  $S$ , при которой достигается максимальная эффективность и предотвращается кавитационный износ рабочих поверхностей.

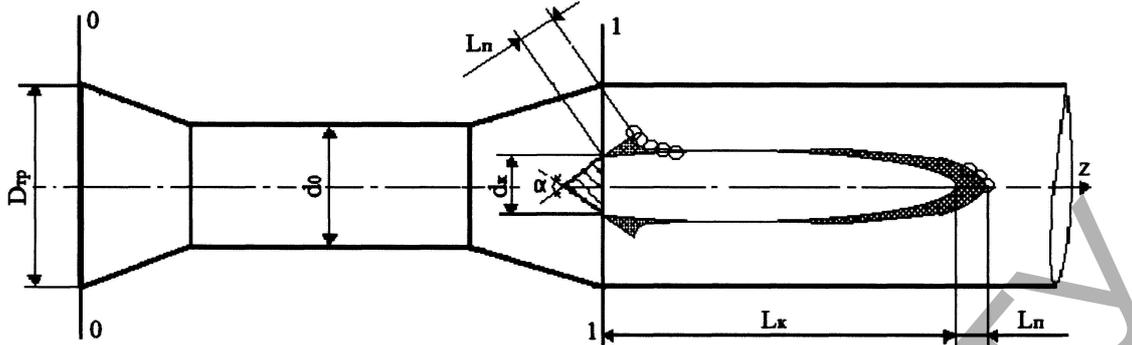


Рис. 3. Схема распространения кавитационных пузырьков в зоне суперкаверны

Для кольцевого сечения

$$s = \frac{d^2}{D^2 - d^2},$$

где  $d$  – диаметр обтекателя, м;

$D$  – внутренний диаметр диффузора в плоскости проходящей через основание конуса-обтекателя, м.

Загромождение, достаточное для нормального протекания процесса  $s = 0,3 \div 0,5$ . При больших значениях происходит резкий рост гидравлического сопротивления такого кавитатора, а эффективность обработки возрастает незначительно.

$$d_k = \sqrt{\frac{s \cdot D^2}{1 + s}}.$$

Т.о. основываясь на эмпирических и рассчитанных величинах, выбираем конический обтекатель с углом раскрытия конуса  $\alpha = 90^\circ$  и диаметром основания  $d_k = 0,035$  м.

Необходимая минимальная длина прямолинейного участка трубопровода за обтекателем  $L$ , позволяющая избежать кавитационной эрозии рабочих поверхностей, но достаточная для протекания процесса гидродинамической кавитационной обработки материала, будет равна сумме максимальных величин длины суперкаверны  $L_s$  и длины пробега кавитационных пузырьков  $L_p$  (рис. 3):

$$L = L_s + L_p.$$

Здесь

$$L_p = t_k \cdot v_{\max},$$

где  $t_k$  – время коллапса кавитационного пузырька, с;

$v_{\max}$  – максимальная скорость движения, м/с.

Тогда уравнение можем записать в виде  $L = L_s + t_k \cdot v_{\max}$ .

Необходимый диаметр трубопровода рассчитывается из тех же условий, что и длина. В этом случае

$$D = d_s + L_p \cdot \cos(90 - \alpha/2),$$

или

$$D = d_s + t_k \cdot v_{\max} \cdot \cos(90 - \alpha/2),$$

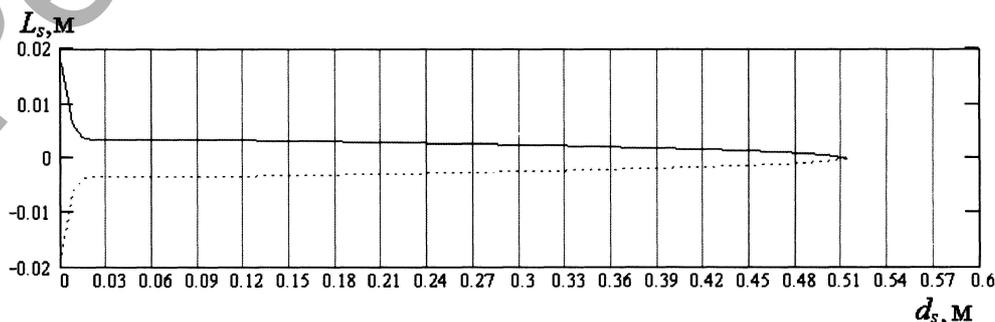


Рис. 4. Теоретическая суперкаверна

где  $\alpha$  – угол при вершине конуса-обтекателя (здесь  $\alpha = 90^\circ$ ).

Длину  $L_s$  и диаметр  $d_s$  каверны в закрученном потоке, соответствующие максимальной скорости, рассчитываем на основании составленного уравнения изменения кинетической энергии для элементарного объема  $dV$ , воспользовавшись уравнением Бернулли для потока жидкости и уравнением неразрывности, путем интегрирования полученной системы дифференциальных уравнений [6]:

$$\begin{cases} v_r = \sqrt{\frac{4\pi \cdot r \cdot \sigma}{\rho \cdot Q} \frac{dz}{dt} + 2 \frac{p_2 - p_k}{\rho} - 2 \frac{v_\tau^2}{r} \cdot dr} \\ v_z = \frac{4Q}{\pi \cdot (D^2 - 4r^2)} \\ \frac{dr}{dt} = v_r; \frac{dz}{dt} = v_z; \frac{d\varphi}{dt} \cdot r = v_\tau \end{cases}$$

где  $v_r$ ,  $v_z$  и  $v_\tau$  – радиальная, осевая и тангенциальная составляющие скорости, м/с.

Расчет проводится в допустимой области определения функции. Расчетный график формы каверны для закрученного потока в нашем случае следующий (см. рис. 4).

То есть длина каверны  $L_s \approx 0,514$  м, диаметр  $d_s$  не превышает диаметра основания обтекателя.

Для определения времени роста и замыкания кавитационного пузырька воспользуемся уравнением движения границы сферической каверны:

$$R \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{P - p_\infty}{\rho},$$

где  $R$  – радиус каверны, м;

$\frac{dR}{dt} = v_r$  – радиальная скорость, м/с;

$\frac{d^2 R}{dt^2} = a_r$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>;

$P$  – давление на границе каверны, Па;

$p_{\infty}$  – давление в потоке жидкости, Па.

Время коллапса, соответствующее времени от начала роста пузырька до его полного схлопывания, с учетом дополнительных параметров (поверхностного натяжения  $\sigma$ , свойств сред внутри и снаружи каверны), рассчитывается из преобразованного дифференциального уравнения второго порядка

$$R \cdot \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho} \left( p_H - 4 \cdot \mu \cdot \frac{v_r}{R} - \frac{2 \cdot \sigma}{R} - p_{\infty} \right).$$

Далее, имея время коллапса пузырьков ( $t_k = 0,002 \div 0,003$  с), зная скорость и направление их движения в пространстве, можем определить и диапазон кавитационного воздействия в рабочем объеме аппарата.

Необходимая длина трубопровода за кавитатором (с учетом коэффициента  $\psi = 1,25$ )

$$L = 0,514 + 0,0025 \cdot 8,37 \cdot 1,25 = 0,54 \text{ м.}$$

Проверяем, достаточен ли имеющийся диаметр трубопровода для предотвращения его кавитационной эрозии:

$$D = 0,035 + 0,0025 \cdot 8,37 \cdot \cos 45^\circ \cdot 1,25 = 0,05 \text{ м.}$$

$D < d_v$  – условие выполняется.

Исходя из конструктивных соображений и имеющихся экспериментальных данных по размерам заглупления конуса в диффузор, обтекатель может быть установлен статически с постоянным заглуплением по следующей схеме (рис. 5).

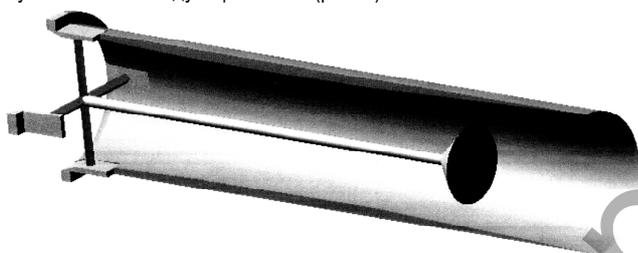


Рис. 5. Вариант установки обтекателя

Опоры штока ромбовидного сечения, установленные за завихрителем, будут способствовать дополнительному измельчению обрабатываемого материала и выполнять функции своеобразной кавитационной решетки.

**Заключение.** Предложенная методика позволяет оперативно подобрать размеры сверхкавитационного аппарата при одном из двух рассмотренных вариантов кавитатора при заданной производительности установки.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петров, О.А. Исследование и моделирование гидродинамических кавитаторов / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность сегодня. – 2003. – № 12 – С. 52–56.
2. Петров, О.А. Статические суперкавитаторы для гидродинамической обработки материалов / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность. – 2004. – Т. 81, № 2. – С. 68–72.
3. Гидродинамический кавитационный реактор: пат. № 6932 Республика Беларусь 7 D 21 B 1/36 / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович. – № а20011031; заявл. 03.12.2001; опубл. 30.06.2003. – Режим доступа: <http://www.belgopatent.org.by/database/index.php?pref=inv&lng=ra&page=3&target=MjAwMTcwMzE=>. – Дата доступа: 13.11.2013.
4. Гидродинамический кавитационный аппарат: пат. № 15001 Республика Беларусь В 01 F 13/06 / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич. – № а20091315; заявл. 11.09.2009; опубл. 30.04.2011. – Режим доступа: <http://www.belgopatent.org.by/database/index.php?pref^nv&lng=ro&page=3&target=MjAwOTcwMTU=>. – Дата доступа: 13.11.2013.
5. Петров, О.А. Востребованность в широком спектре (применение суперкавитирующих аппаратов для повышения эффективности технологических процессов) / О.А. Петров, В.И. Романовский // Aquamagazine. – 2013. – № 4(68). – С. 48–50.
6. Петров, О.А. Математическая модель расчета параметров каверны / О.А. Петров, П.Е. Вайтехович // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-технич. наук. – 2004. – № 2. – С. 35–37.

Материал поступил в редакцию 25.02.15

#### PETROV O.A., ROMANOVSKY V.I. Technique of development of the hydrodynamic supercavitating devices

In article the technique allowing to pick up quickly the sizes of the supercavitational device at one of two considered options of execution of a kavitator is offered: the first presents himself metal plates with a fairing in the form of spheres, the second – in the form of Venturi's nozzle with a conic fairing.

УДК 539.4

Шматок Е.В., Остриков О.М.

### РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ Mn И Ga В МАРТЕНСИТНОЙ ФАЗЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА Ni<sub>2</sub>MnGa У ЛИНЗОВИДНОГО ОСТАТОЧНОГО НЕКОГЕРЕНТНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКА

**Введение.** Исследование физико-механических свойств ферромагнитного сплава Ni<sub>2</sub>MnGa являлось приоритетной задачей многих исследований и проведено на достаточно высоком уровне [1–7]. Интерес к материалу обусловлен широкими возможностями его практического применения, благодаря уникальным физико-механическим свойствам [8]. Однако, наиболее успешное техническое применение нового материала в качестве функционального элемента технических систем и в производстве, требует исчерпывающего ответа на вопрос о зависимости распределения легирующих компонентов в моделируемой среде от величины внутренних напряжений, обусловленных механи-

ческим двойникованием мартенситной фазы Ni<sub>2</sub>MnGa.

Распределение легирующих компонентов в расплаве, в процессе его получения неравномерно. На протекание диффузионных процессов непосредственно влияют области скопления дислокаций, образовавшиеся в результате кристаллизации монокристалла и последующего его деформирования. В итоге, с течением времени в монокристалле происходит диффузионное перераспределение элементов, приводя к их избыточной концентрации в непрогнозируемых областях. В свою очередь это оказывает влияние на функциональные свойства монокристалла (магнитоэластичность, магниточувствительность, время и

Остриков Олег Михайлович, к.физ.-мат.н., доцент, зав. кафедрой «Инженерная графика» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

Шматок Евгений Викторович, магистр технических наук, аспирант кафедры «Инженерная графика» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

Беларусь, ГГТУ, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.