

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

## MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621. 762. 1

10.23947/1992-5980-2017-17-3-103-109

### Кинетика возникновения трещин в осаживаемых цилиндрических образцах\*

**М. С. Егоров<sup>1</sup>, Р. В. Егорова<sup>2</sup>, В. Н. Пустовойт<sup>3</sup>, Г. А. Баглюк<sup>4\*\*</sup>**<sup>1,2,3</sup> Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация<sup>4</sup> Институт проблем материаловедения имени И. Н. Францевича НАН Украины

### Crack initiation kinetics in upset cylindrical samples \*\*\*

**M. S. Yegorov<sup>1</sup>, R. V. Yegorova<sup>2</sup>, V. N. Pustovoyt<sup>3</sup>, G. A. Baglyuk<sup>4\*\*\*</sup>**<sup>1,2,3</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation<sup>4</sup> Frantsevich Institute of Materials Science Problems, National Academy of Sciences of Ukraine

*Введение.* Статья посвящена анализу трещинообразования в порошковом теле, а также выявлению основных законов трещинообразования в свободно осажённом материале. Цели работы — изучение кинетики возникновения и распространения трещин в свободно осажённых порошковых материалах, микроструктуры легированных и железных порошков в различных зонах с целью определения условий бездефектного деформирования материала в условиях свободной осадки. Анализ развития трещин в порошковом теле имеет важное практическое значение, поэтому исследование этого вопроса является важной составляющей изготовления бездефектных деталей

*Материалы и методы.* Рассмотрены новые порошковые материалы шведской фирмы Хеганес, которые характеризуются улучшенными характеристиками деформируемости. Также данные материалы отличаются наличием легированных элементов — Ni и Mo, которые влияют на трещинообразование. В работе проведен анализ микроструктур осажённых образцов с помощью металлографического микроскопа.

*Результаты исследования.* Трещины в осажённых материалах классифицируются как трещины отрыва. Происхождение трещин обуславливается отсутствием факторов для проявления пластичности металлической составляющей образца ввиду наличия дефектов и пор в его теле. Установлено, что быстрый рост трещин подтверждается характером трещины, когда она практически не имеет продолжения в материал образца и, кроме того, заканчивается под углом к направлению развития.

*Обсуждение и заключения.* Проведенный анализ развития микротрещин позволяет выявить морфологические отличия структуры центральной и периферийной зон порошкового материала. Периферийная область характеризуется различными значениями зерен и увеличенным содержанием микропор, направленностью скопления микронесплошностей и неметаллических включений, в направлении бывших границ физического раздела частиц металлического порошка.

*Introduction.* The article is devoted to the crack occurrence analysis in a powder body, and identification of the basic laws of this process in the freely upset material. The work objective is to study kinetics of crack initiation and propagation in freely upset powder materials, and microstructure of alloy and iron powders in a variety of areas in order to determine the conditions for defect-free deformation of the material under free upsetting. The analysis of the crack development in a powder body is of great practical importance, and therefore, the investigation of this problem is essential for the fabrication of accepted parts.

*Materials and Methods.* New powder materials from the Swedish company Höganas which are characterized by the improved deformation characteristics are considered. Besides, these materials differ in occurrence of alloy elements, such as Ni and Mo which affect cracking. Microstructures of the upset samples are analyzed using the metallographic microscope.

*Research Results.* Cracks in the upset materials are classified as cleavage cracks. The crack origin is determined by the absence of factors for the development of the sample metal component plasticity due to the occurrence of defects and pores in its body. It is established that rapid cracking is confirmed by the nature of the crack when it scarcely has extension into the sample material, and, moreover, ends at an angle to the area for development.

*Discussion and Conclusions.* The analysis of the microcrack development allows identifying morphological structural differences of the central and fringe regions of the powder material. The peripheral area is characterized by different values of grains and increased content of micropores, and the directivity of clusters of micro-discontinuities and non-metallics, in the line of the former physical interface of the metal powder particles.

\* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

\*\* E-mail: aquavdonsk@mail.ru, gbag@rambler.ru, fipm-dstu@mail.ru

\*\*\* The research is done within the frame of the independent R&amp;D.

**Ключевые слова:** порошковая металлургия, горячая деформация, микроструктура, свободная осадка, трещины.

**Keywords:** powder metallurgy, hot deformation, microstructure, free upsetting, cracks

**Образец для цитирования:** Егоров, М. С. Кинетика возникновения трещин в осаживаемых цилиндрических образцах / М. С. Егоров, Р. В. Егорова, В. Н. Пустовойт, Г. А. Баглюк // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 103–109.

**For citation:** M. S. Yegorov, R.V. Yegorova, V. N. Pustovoyt, G. A. Baglyuk. Crack initiation kinetics in upset cylindrical samples. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 103–109.

**Введение.** Производство изделий, имеющих сложную технологическую форму, методом горячей штамповки из цилиндрических заготовок приводит к развитию боковой деформации на периферийной поверхности [1–3].

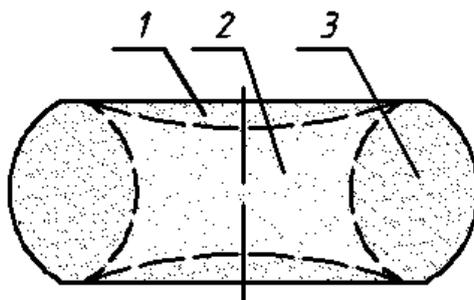


Рис. 1 Основные области деформации при свободной осадке образца

*Fig. 1. Base deforming regions under free sample upsetting*

На рис. 1 изображена схема распределения зон в объеме деформированного образца. Учитывая то, что при анализе полученных данных стоит задача рассмотреть роль этих областей на процесс деформации материала, приведем описание каждой области. Области минимальной деформации (1), претерпевают минимальную высотную и радиальную деформации; максимальная область осевой и радиальной деформации (2) имеет максимальную плотность; область наличия тангенциальных растягивающих напряжений (3) имеет минимальную плотность.

Следует отметить, что деформация образца в радиальном направлении, приводящая к увеличению его размера в средней части, создается двумя видами напряжений: основными (сжимающие) и дополнительными (растягивающими).

Сжимающие напряжения в образце возникают в результате действия деформирующих усилий. Эти напряжения деформируют частицы не только в направлении действия деформирующих усилий, но и в поперечном направлении, что приводит к увеличению размеров образца. Сжимающие напряжения в третьей области (рис. 1) не вызывают появления дефектов, так как их взаимодействие в этой области приводит к сжатию материала, а это значит, что предельные дополнительные (растягивающие) напряжения на поверхностях частиц не возникают.

Напряжения в третьей области являются в большей степени растягивающими. Их влияние обусловлено различной способностью первой и третьей областей деформироваться. Первая область стремится к увеличению размеров (более интенсивное деформирование в радиальном направлении), что и приводит к появлению дополнительных напряжений. Установлено, что деформация в поперечном направлении первой области возможна после уменьшения пористости, а, как следствие, и плотности материала. Дополнительные напряжения, которые возникают в процессе деформации, действуют на крайние металлические частицы материала, приводя изменение их параметров, что связано с увеличением объема детали. Когда порошковый материал достигает предельных значений дополнительных растягивающих напряжений происходит полное разрушение. Это приводит к появлению продольных трещин на бочкообразной поверхности осаживаемого образца.

**Экспериментальная часть.** Анализ кинетики распространения трещин проводился на образцах, выполненных из порошкового материала Astaloy 85 Mo, легированного 0,85% молибдена шведской фирмы «Höganäs». Рассматриваемый материал имеет хорошую степень прессуемости и обладает однородной микроструктурой после спекания. Свободную деформацию нагретых пористых образцов проводили без матрицы, что обусловило наличие сухого трения на контактных поверхностях. Для этого применялся молот с весом ударной части 500Н. Подготовленные после свободной осадки микрошлифы изучали с помощью металлографического микроскопа METAVERT (фирмы REICHERT, Австрия) [4].

**Обсуждение и результаты.** Детальное описание трещинообразований, возникающих при различных напряженно-деформированных состояниях монолитных материалов, рассмотрена в [5,6]. Трещины, получаемые после

динамического горячего прессования, можно классифицировать как трещины отрыва. Основанием для этого могут служить следующие признаки:

1) возникновение дефекта в виде трещины начинается на наружной (бочкообразной) поверхности образца. Для рассматриваемых материалов инициаторами возникновения трещин могут быть дефекты, возникающие на межчастичной поверхности сращивания около боковой поверхности, которые играют роль концентраторов напряжений. Развитие микротрещины на поверхности материала происходит в местах этих дефектов за счет уменьшения межчастичных связей порошка. В процессе динамического прессования возникают участки с разным уровнем межчастичного сращивания. Именно такие участки и могут быть областями облегченного развития трещин. Таким образом, происхождение трещин обусловлено отсутствием факторов для проявления пластичности металлической составляющей образца ввиду наличия указанных дефектов и пор в его теле;



Рис. 2. Трещина на поверхности осаженного порошкового образца Astaloy 85 Mo ( $\times 100$ ).

Пористость  $P = 30\%$ ;  $t_n = 950^\circ$ ;  $\tau = 10$  мин

*Fig. 2. Crack on upset powder sample surface: Astaloy 85 Mo ( $\times 100$ );*

*porosity  $P = 30\%$ ;  $t_n = 950^\circ$ ;  $\tau = 10$  min*

2) появляющиеся трещины можно отнести к простым, так как на поверхности они имеют форму неразветвленных полосок, расположенных вдоль образующей цилиндрической поверхности образца (рис. 2);

3) исследуемые трещины имеют распространение в радиальной вертикальной плоскости 1–1 относительно оси образца (рис. 2);

4) увеличение трещин происходит в горизонтальной плоскости 2–2, нормальной к плоскости ее распространения, т.е. 1–1 (рис. 3).

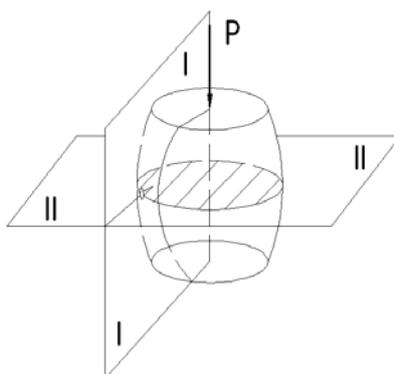


Рис. 3 Обозначение расположения плоскостей распространения 1–1 и раскрытия 2–2 трещин при свободной деформации материала

*Fig. 3. Marking lay-out of planes of crack propagation 1–1 and crack opening 2–2 under free deformation of the material*

Дополнительные растягивающие напряжения в периферийном кольцевом объеме пористого материала имеют пиковое значение, что обусловлено наличием пор. Такое состояние вызывает напряжения, которые вызывают нарушение однородности пористого тела прежде, чем средние напряжения достигают для него предела текучести. Зарождение трещин начинается на периферии межчастичной поверхности, характеризующейся малым качеством сращивания, ослабленными растягивающими напряжениями, действующими при горячей деформации.

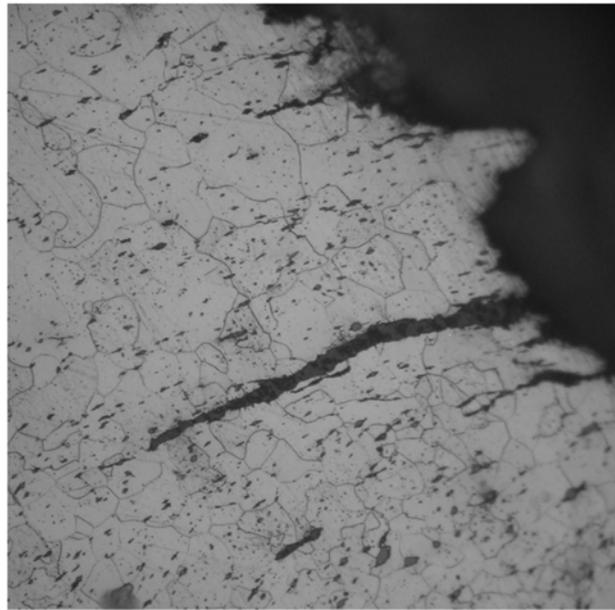


Рис. 4 Трещина расположенная в плоскости 2–2 при осадке образца: спеченный Astaloy 85 Mo ( $\times 100$ ):  $P=30\%$ ;  $t_n=950^{\circ}$ ;  $\tau=10$  мин

*Fig. 4. Crack located in 2–2 plane under sample upsetting: sintered Astaloy 85 Mo ( $\times 100$ ):  $P=30\%$ ;  $t_n=950^{\circ}$ ;  $\tau=10$  min*

Развитие трещины происходит по межчастичной поверхности сращивания согласно механизму разрушения металлического каркаса между порами. Скорее всего, развитие трещины у образцов, как результат низкой пластичности материала, следует рассматривать поэтапно. Предлагаются следующие этапы возникновения трещин при свободной осадке образцов.

Этап первый. Общее уменьшение пористости материала на некоторое расстояние вглубь образца в районе бочки (рис. 5б).

Экспериментально показано, что пластическое «разрыхление» можно оценить остаточным увеличением объема металла [7,8]. Положения о «разрыхлении» материала образца при его пластическом деформировании подтверждаются при испытании порошковых образцов [9,10]. Однако, необходимо учитывать происходящее в центральной части образца уплотнение, а понятие о «разрыхлении» в большей мере пригодно для оценки состояния периферийных участков материала образца, примыкающего к его бочкообразной поверхности (рис. 5б).

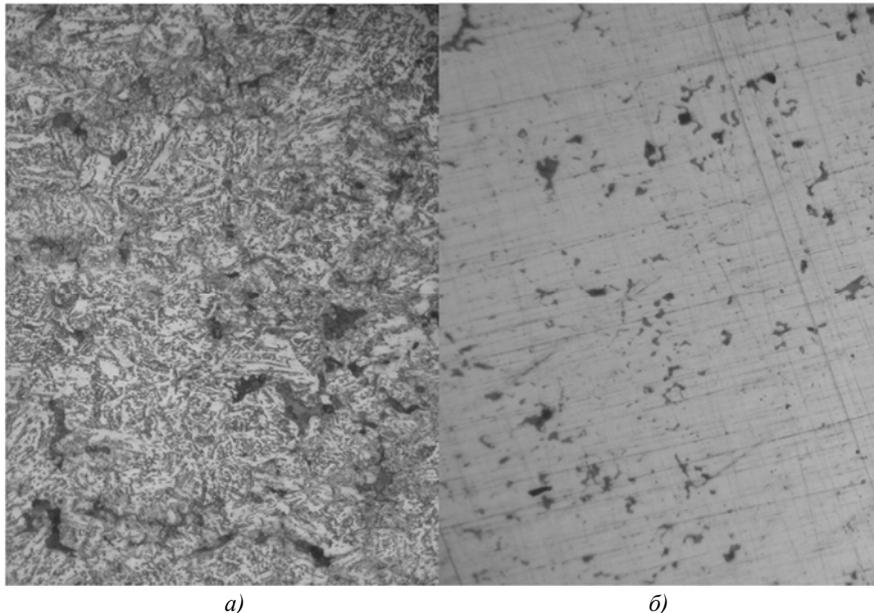


Рис. 5. Микроструктура периферийной области образца до (а) и после (б) деформации для образцов ( $\times 100$ ): спеченный Astaloy 85 Mo; пористость начальная 20%;  $t_n=950^{\circ}$ ;  $\tau=10$  мин

*Fig. 5. Microstructure of sample peripheral region before (a) and after (b) deformation for samples ( $\times 100$ ): sintered Astaloy 85 Mo; initial porosity = 20%;  $t_n=950^{\circ}$ ;  $\tau=10$  min*

«Разрыхление» периферийной области образца происходит с некоторым относительным перемещением и поворотом частиц порошка, которое сопровождается разрыванием и возникновением металлических связей между ними. Кроме этого, порошок деформируясь изменяет форму в направлении действующих напряжений. Такое поведение микрочастиц в периферийной зоне образца приводит к возникновению субмикро- и микроразрушений на границах частиц порошка. Однако, эти механизмы на первом этапе зарождения трещин не могут привести к их рождению, так как максимальные напряжения еще выражены незначительно. Нарушение «целостности» структуры образца путем визуального осмотра при увеличении до  $\times 60$  обнаружить не удается.

Третий этап. Локальное разрыхление мест на периферийной поверхности с образованием дефектов в процессе деформации. Во время этого этапа зарождаются трещины, напряжения достигают своего максимума. Скопление субмикро- и микроразрушений между определенными частицами порошка достигает своего порогового значения, превращаясь в макроразрушения в виде трещин.

К концу рассматриваемого этапа образования трещин, бочкообразная поверхность в районе ее максимального диаметра получает некоторое «разрыхление» своей исходной структуры, что вызвано действием дополнительных растягивающих напряжений.

Этап третий. Мгновенный рост трещины, характерный ее значительным распространением в горизонтальной плоскости 1–1 и раскрытием в вертикальной плоскости 2–2 (рис. 6) при сравнительно небольшом приращении удельной работы деформирования.

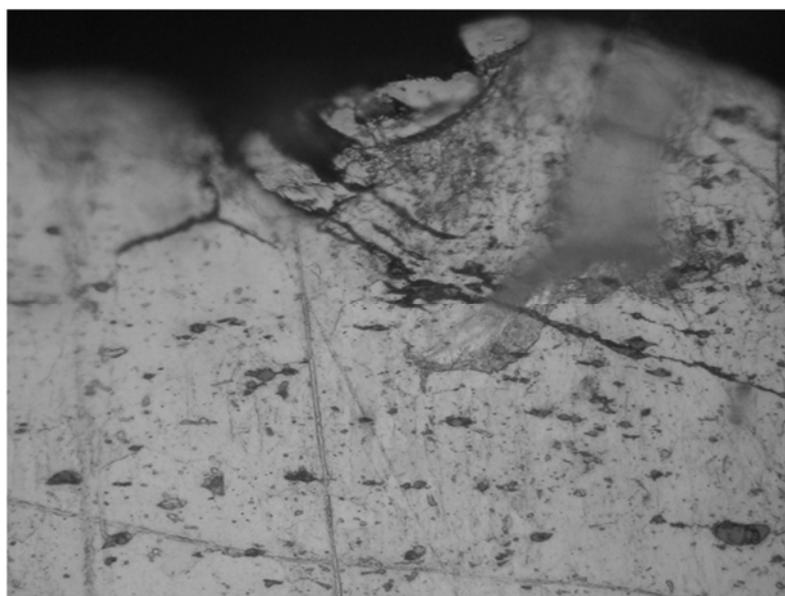


Рис. 6. Начало зарождения трещины  $\times 200$

*Fig. 6. Beginning of crack initiation  $\times 200$*

Следует заметить отметить, что быстрый рост трещин на последнем этапе подтверждается характером трещины, когда она практически не имеет продолжения в материал образца и, кроме того, заканчивается под углом к направлению развития.

**Выводы.** Проведенный анализ возникновения, развития микротрещин позволяет выявить морфологические отличия структуры центральной и периферийной зон порошкового материала. Периферийная область характеризуется различными значениями зерен и увеличенным содержанием микропор, направленностью скоплений микронесплошностей и неметаллических включений в направлении бывших границ физического раздела частиц металлического порошка.

#### **Библиографический список**

1. Егорова, Р. В. Микроструктурный анализ поверхности деталей ступенчатой формы / Р. В. Егорова // *Металлург.* — 2009. — №6. — С.65–67.
2. Синельщиков, В. В. Оценка пластичности пористого материала в нагретом состоянии для свободной осадки образцов / В. В. Синельщиков, А. С. Разумный // *Порошковые и композиционные материалы и изделия* : сб. науч. тр. — Новочеркасск : ЮРГТУ, 2000. — С.35–41.
3. Григорьев, А. К. Деформация и уплотнение порошковых материалов / А. К. Григорьев, А. И. Рудской. — Москва :Металлургия, 1992. — 192 с.

4. Егорова, Р. В. Структура и свойства порошковых спеченных материалов для горячей штамповки деталей сложной формы : дисс. канд. техн. наук / Р. В. Егорова. — Ростов-на-Дону, 2013. — 163с.
5. Губкин, С. И. Деформируемость металлов / С. И. Губкин. — Москва : Metallurgizdat, 1953. — 200с.
6. Егорова, Р. В. Свободная осадка нагретых цилиндрических образцов порошковых материалов ASTALOY 85 MO, DISTALOY HP фирмы «Höganäs» / Р. В. Егорова, М. С. Егоров, А. В. Скориков // *Металлург.* — 2013. — №5. — С.82–86.
7. E. Robert-Perron, C. Blais & S. Pelletier. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state / E. Robert-Perron, C. Blais & S. Pelletier // *Powder Metallurgy* — 2009. — Vol. 52, no. 1. — P. 80 – 83.
8. Синельщиков, В. В. Исследование свойств нагретых пористых порошковых материалов при динамических нагрузках : дисс. канд. техн. наук / В. В. Синельщиков. — Новочеркасск, 1979. — 186с.
9. Егорова, Р. В. Особенности формирования межчастичного сращивания в условиях уплотнения при наличии растягивающего напряженного состояния / Р. В. Егорова // *Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства : матер. междунар. науч.-техн. конф.* — Севастополь, 2008. — С.78–82.
10. Дорофеев, В. Ю. Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов / В. Ю. Дорофеев, С. Н. Егоров. — Москва, 2003. — с. 152.

### References

1. Yegorova, R.V. Mikrostrukturnyy analiz poverkhnosti detaley stupenchatoy formy. [Microstructure analysis of surface for details of stepped form.] *Metallurgist*, 2009, no. 6, pp. 65–67 (in Russian).
2. Sinelshchikov, V.V., Razumny, A.S. Otsenka plastichnosti poristogo materiala v nagretom sostoyanii dlya svobodnoy osadki obraztsov. [Estimation of porous material plasticity in heated state for free upsetting of samples.] *Poroshkovye i kompozitsionnye materialy i izdeliya: sb. nauch. tr.* [Powder and composite materials and products: Coll. Sci. papers.] *Novocherkassk: YuRGTU*, 2000, pp. 35–41 (in Russian).
3. Grigoryev, A.K., Rudskoy, A.I. Deformatsiya i uplotnenie poroshkovykh materialov. [Deformation and compaction of powder materials.] *Moscow: Metallurgiya*, 1992, 192 p. (in Russian).
4. Yegorova, R.V. Struktura i svoystva poroshkovykh spechennykh materialov dlya goryachey shtampovki detaley slozhnoy formy: diss. kand. tekhn. nauk. [Structure and properties of powder sintered materials for hot stamping of complex parts: Cand.Sci. (Eng.) diss.] *Rostov-on-Don*, 2013, 163p. (in Russian).
5. Gubkin, S.I. Deformiruemost' metallov. [Deformability of metals.] *Moscow: Metallurgizdat*, 1953, 200 p. (in Russian).
6. Yegorova, R.V. Svobodnaya osadka nagretykh tsilindricheskikh obraztsov poroshkovykh materialov ASTALOY 85 MO, DISTALOY HP firmy «Höganäs». [Free upset of heated cylindrical samples of powders ASTALOY 85 MO and DISTALOY HP-1 of firm «Höganäs».] *Metallurgist*, 2013, no. 5, pp. 82–86 (in Russian).
7. E. Robert-Perron, C. Blais & S. Pelletier. Tensile properties of sinter hardened powder metallurgy components machined in their green state. *Powder Metallurgy*, 2009, vol. 52, no. 1, pp. 80 – 83.
8. Sinelshchikov, V.V. Issledovanie svoystv nagretykh poristykh poroshkovykh materialov pri dinamicheskikh nagruzkakh: diss. kand. tekhn. nauk. [Investigation of properties of heated porous powder materials under dynamic loads: Cand.Sci. (Eng.) diss.] *Novocherkassk*, 1979, 186 p. (in Russian).
9. Yegorova, R.V. Osobennosti formirovaniya mezhchastichnogo srashchivaniya v usloviyakh uplotneniya pri nalichii rastyagivayushchego napryazhennogo sostoyaniya. [Formation specifics of interparticle splicing under compaction conditions in the presence of stretching stress state.] *Materialy i mekhanizmy morskogo transporta. Metody issledovaniya i uprochneniya. Tekhnologiya proizvodstva: mater. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Materials and mechanisms of sea transport. Methods of research and hardening. Production technology: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.] *Sevastopol*, 2008, pp. 78–82 (in Russian).
10. Dorofeev, V.Y., Yegorov, S.N. Mezchastichnoe srashchivanie pri formirovanii poroshkovykh goryachedeformirovannykh materialov. [Interparticle splicing under the formation of hot powdered materials.] *Moscow: Metallurgizdat*, 2003, 151 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 14.04.2017  
Сдана в редакцию 14.04.2017  
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 14.04.2017  
Submitted 14.04.2017  
Scheduled in the issue 17.07.2017

**Об авторах:**

**Егоров Максим Сергеевич,**

доцент кафедры «Технология машиностроения»,  
Донского государственного технического университета  
(РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),  
кандидат технических наук,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4289-1601>  
[aquavdonsk@mail.ru](mailto:aquavdonsk@mail.ru)

**Егорова Римма Викторовна,**

старший преподаватель кафедры «Технический сервис  
и информационные технологии» Института технологии  
(филиал) Донского государственного технического  
университета (ДГТУ) (РФ, г. Волгодонск, ул. Мира, 16),  
кандидат технических наук,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1082-3970>  
[aquavdonsk@mail.ru](mailto:aquavdonsk@mail.ru)

**Пустовойт Виктор Николаевич,**

заведующий кафедрой «Физическое и прикладное  
материаловедение» Донского государственного  
технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-  
Дону, пл. Гагарина,1), доктор технических наук,  
профессор,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1276-5249>  
[fipm-dstu@mail.ru](mailto:fipm-dstu@mail.ru)

**Баглюк Геннадий Анатольевич,**

заместитель директора по науке Института проблем  
материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины  
(Украина, 03142, Киев, ул. Академика  
Кржижановского, 3), доктор технических наук, старший  
научный сотрудник,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3305-8896>  
[gbag@rambler.ru](mailto:gbag@rambler.ru)

**Authors:**

**Yegorov, Maxim S.,**

associate professor of the Engineering Technology  
Department, Don State Technical University (RF, 344000,  
Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Cand.Sci. (Eng.),  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4289-1601>  
[aquavdonsk@mail.ru](mailto:aquavdonsk@mail.ru)

**Yegorova, Rimma V.,**

senior lecturer of the Technical Service and Information  
Technologies Department, Institute of Technology (DSTU  
branch) (RF, Volgodonsk, ul. Mira, 16), Cand.Sci. (Eng.),  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1082-3970>  
[aquavdonsk@mail.ru](mailto:aquavdonsk@mail.ru)

**Pustovoyt, Victor N.,**

head of the Material Physics and Applied Hylology  
Department, Don State Technical University (RF, 344000,  
Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.),  
professor,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1276-5249>  
[fipm-dstu@mail.ru](mailto:fipm-dstu@mail.ru)

**Baglyuk, Gennady A.,**

Associate Director on Research, Frantsevich Institute of  
Materials Science Problems, National Academy of Sciences  
of Ukraine (Ukraine, 03142, Kiev, ul. Akademika  
Krzhizhanovskogo, 3), Dr.Sci. (Eng.), senior research  
scholar,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3305-8896>  
[gbag@rambler.ru](mailto:gbag@rambler.ru)