

УДК 621.789

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА РАЗМЕР ЧАСТИЦ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ, ТВЕРДОСТЬ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СТАЛЕЙ UDDEHOLM ELMAX И AISI420MoV

*Дильдин А.Н.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Техника и технология производства материалов» (andildin@mail.ru)*

*Герасимов В.Ю.<sup>2</sup>, заместитель генерального директора (v\_u\_gerasiv@mail.ru)*

*Трофимов Е.А.<sup>1</sup>, д.х.н., профессор кафедры «Техника и технология производства материалов» (tea7510@gmail.com)*

*Матвеева М.А.<sup>1</sup>, инженер кафедры «Техника и технология производства материалов» (matveevama@susu.ru)*

*Музафарова И.В.<sup>1</sup>, магистрант кафедры «Техника и технология производства материалов» (irinaa\_93@mail.ru)*

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоуст  
(456209, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева, 16)

<sup>2</sup> ООО «Компания «АиР»»

(456200, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Таганайская, 204)

**Аннотация.** Разработка надежных и долговечных композиционных материалов, получаемых из различных по свойствам составляющих, является актуальной задачей. К числу таких материалов относятся и многослойные стали. Чередование большого количества разнородных слоев позволяет получать свойства, недостижимые для однородной стали. Использование диффузионной сварки позволяет создать ряд композиционных материалов на основе инструментальных порошковых сталей (Uddeholm Elmax), свойства которых позволяют использовать их при производстве режущего инструмента. Целью настоящей работы стало изучение влияния режимов термической обработки на структуру и эксплуатационные свойства разработанной многослойной композиции на основе стали марки Uddeholm Elmax и низкоуглеродистой нержавеющей ножевой стали марки AISI420MoV. В процессе исследования были изучены структуры исходных сталей и композиционного материала после отжига, а затем после закалки и отпуска. Металлографические исследования образцов проводили с помощью анализатора изображений Thixomet. Структура всех образцов была рассмотрена в продольном сечении. Оценивали общий вид поверхности образцов на наличие каких-либо дефектов и неметаллических включений. Для этого рассматривали панорамные снимки образцов. Также были выполнены измерения величины частиц карбидов и определена ширина слоев в многослойной композиции. Показано, что исследуемый материал имеет выраженную слоистую структуру с резким переходом от одного слоя к другому. Используемая при производстве композиционного материала технология обеспечивает отсутствие переходной зоны между слоями. Также не обнаружено типичных дефектов (расслоений, пор, оксидных включений) диффузионной сварки. Установлено, что при термической обработке размер включений карбидов в структуре композиционного материала уменьшается, а их число увеличивается. Слои, образованные сталями марок Uddeholm Elmax и AISI420MoV, отличаются числом таких включений. Происходящие при термической обработке структурные превращения приводят к увеличению поверхностной твердости (по Роквеллу) исследуемого материала. Также выполнено исследование коррозионной стойкости и микротвердости композиционного материала. Результаты работы позволили рекомендовать режим термической обработки изученной композиции.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, структура, термическая обработка, эксплуатационные характеристики.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-461-466

### ВВЕДЕНИЕ

Требования к эксплуатационным характеристикам сталей и сплавов постоянно возрастают. Однородный материал зачастую не способен обеспечить требуемых потребителем свойств. Разработка надежных и долговечных композиционных материалов, получаемых из различных по свойствам составляющих, является актуальной задачей. К числу таких материалов относятся многослойные стали, которые, несмотря на

длительную историю их изготовления и применения [1 – 7], благодаря своим характеристикам привлекают внимание специалистов до настоящего времени [6 – 20]. Чередование большого количества разнородных слоев позволяет получать свойства, которые часто недостижимы для однородной стали [1, 2, 18]. При производстве таких композиций возникает большое количество проблем. Плодотворным направлением в создании композиционных сталей является использование с этой целью диффузионной сварки. Совокуп-

ность технологических приемов, разработанных специалистами «Компании “АиР”», позволила, используя диффузионную сварку, создать ряд композиционных материалов, свойства которых позволяют использовать их при производстве режущего инструмента. К числу разработанных композиций относятся материалы на основе инструментальных порошковых сталей, в том числе на основе стали марки Uddeholm Elmax. Тщательное изучение характеристик разработанных композиций, а также подбор режима их термической обработки могут позволить существенно расширить сферу их применения.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы является изучение влияния термической обработки на особенности структуры и некоторые эксплуатационные свойства многослойной композиции на основе стали марки Uddeholm Elmax и низкоуглеродистой нержавеющей ножевой стали марки AISI420MoV.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основе технологии производства композиционных материалов, разработанной «Компанией “АиР”», лежит диффузионная сварка [21] сталей и сплавов различного состава. Предварительную поверхностную обработку листов свариваемых сплавов проводили высокоточными современными плоскошлифовальными и фрезерными станками. Некоторые материалы подвергали пескоструйной обработке. Перед компактированием заготовки обезжиривали в ультразвуковых ваннах, подготовку поверхностей проводили методами электрохимической активации. Высокое качество процессов диффузионной сварки высоколегированных сталей обеспечивали созданием активной контролируемой атмосферы. За один технологический цикл в зависимости от состава композиции получали блок с 30 – 300 слоями. При необходимости полученный блок проковывали, шлифовали и подвергали дальнейшей диффузионной сварке, после которой блок проковывали на пневматических молотах в квадрат или полосу.

В рамках настоящего исследования изучению подвергали инструментальную порошковую сталь Uddeholm Elmax, а также композиционный материал на

основе этой стали и низкоуглеродистой нержавеющей ножевой стали AISI420MoV. Разработчиком композиции («Компания “АиР”») установлено следующее ее обозначение ZDI-E. Состав сплавов, послуживших основой для создания композиции, представлен в табл. 1.

Режимы термической обработки ( $\tau_b$  – время выдержки;  $\tau_o$  и  $v_o$  – время и скорость охлаждения) порошковой инструментальной стали Uddeholm Elmax представлены ниже:

– отжиг

Нагрев		Охлаждение (печь)			Охлаждение	
$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_b, \text{ч}$	$v_o, ^\circ\text{C}/\text{ч}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$\tau_o, \text{ч}$		$T_2, ^\circ\text{C}$
980	2	20	850	10	750	На воздухе

– закалка

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_b, \text{мин}$	Закалочная среда
1050	10	Воздух
1080	10	Воздух

– отпуск

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_b, \text{мин}$	Охлаждение
180 – 220	90	На воздухе
450	90	На воздухе

Режимы термической обработки ( $v_n$  – скорость нагрева) композиции ZDI-E представлены ниже:

– отжиг

Нагрев		Охлаждение (печь)		Охлаждение
$v_n, ^\circ\text{C}/\text{ч}$	$T, ^\circ\text{C}$	$v_o, ^\circ\text{C}/\text{ч}$	$T, ^\circ\text{C}$	
< 100	850 – 870	< 50	500 – 600	На воздухе

– закалка

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_b, \text{мин}$	Закалочная среда
1000	10	Воздух
1050	10	Воздух
1100	10	Воздух

Т а б л и ц а 1

### Химический состав сталей, использованных для получения исследуемых образцов

Table 1. Chemical composition of steels for samples

Сталь	Содержание элемента, % (по массе)							
	C	Si	Mn	Cr	V	S	P	Mo
Uddeholm Elmax	1,7	0,8	0,3	18,0	3,0	–	–	1,0
AISI420MoV	0,45 – 0,55	1,0	1,0	14,00 – 15,00	0,10 – 0,20	не более 0,03	не более 0,04	0,50 – 0,80

– отпуск

$T, ^\circ\text{C}$	$\tau_v, \text{мин}$	Охлаждение
180	90	На воздухе
180	90	На воздухе
450	90	На воздухе

С целью изучения влияния термической обработки на структуру и эксплуатационные свойства материалов образцы (в протравленном состоянии) исследовали сразу после их отжига, а затем после закалки и отпуска (далее – до и после термической обработки). Металлографические исследования образцов проводили с помощью анализатора изображений Thixomet. Структура всех образцов была рассмотрена в продольном сечении. Оценивали общий вид поверхности образцов на наличие каких-либо дефектов и неметаллических включений. Для этого рассматривали панорамные снимки

образцов (рис. 1). Также были выполнены измерения величины частиц карбидов (до и после термической обработки) и определена ширина слоев в многослойной композиции, которая составила в среднем 40 – 50 мкм. На рис. 2 представлены примеры микрофотографий, полученных при исследовании образцов стали Uddeholm Elmax, а также композита ZDI-E.

Эксплуатационные свойства ножевых материалов определяются как их режущими свойствами, так и стойкостью к атмосферной коррозии. Режущие свойства можно оценивать по такому показателю, как твердость.

В ходе настоящего исследования с помощью твердомера TP-5014 определяли твердость (по Роквеллу) поверхностного слоя изучаемых образцов (для композита исследовали зависимость твердости от температуры закалки). Для композиционного материала ZDI-E с помощью микротвердомера FM-800 исследовали микротвердость различных слоев.



Рис. 1. Микрофотография образца композита ZDI-E до термической обработки

Fig. 1. Micrograph of the ZDI-E composite sample before heat treatment

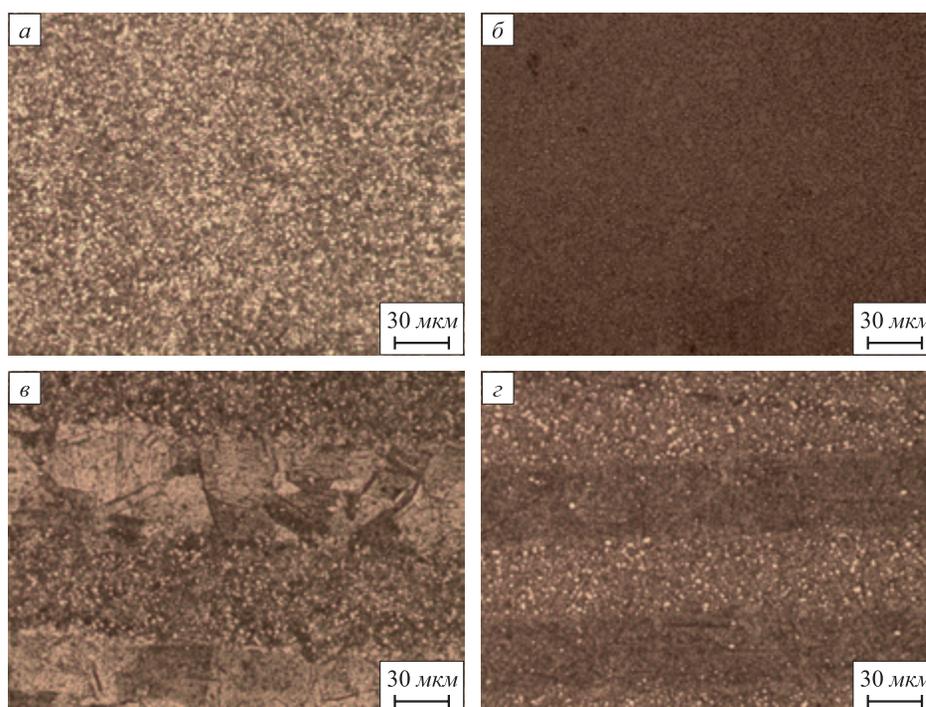


Рис. 2. Микрофотографии образцов стали Uddeholm Elmax до (а) и после (б) термической обработки, композита ZDI-E до (в) и после (г) нее

Fig. 2. Micrographs of Uddeholm Elmax steel samples before (a) and after (б) heat treatment, ZDI-E composite before (в) and after it (г)

Коррозионные испытания материалов проводили по следующей методике. Образцы (Uddeholm Elmax и ZDI-E до и после термической обработки) выдерживали в течение 100 ч в 10 %-ном растворе соляной кислоты при температуре  $20 \pm 1$  °С. Оценку степени коррозионного поражения материалов осуществляли путем подсчета потери массы за единицу времени с единицы площади.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Усредненные результаты исследования размеров частиц карбидов в образцах вместе с результатами статистической обработки проведенных измерений представлены в табл. 2.

Результаты измерения твердости поверхности образцов представлены в табл. 3. Микротвердость (HV) слоев материала ZDI-E до термической обработки составляет 260 (для светлого слоя на основе AISI420MoV) и 370 (для темного слоя на основе Uddeholm Elmax), а после нее – 772 (для светлого слоя на основе Uddeholm Elmax) и 650 (для темного слоя на основе AISI420MoV).

Коррозионное поражение исследованных образцов в описанных выше условиях составило  $88 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

для ZDI-E до термической обработки (по сравнению с  $19 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  для Uddeholm Elmax) и  $196 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  для ZDI-E после нее (по сравнению с  $204 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  для Uddeholm Elmax).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Образцы стали Uddeholm Elmax после отжига представляют собой матрицу феррита с дисперсными карбидными включениями сложного состава. После закалки образцы имеют структуру из мартенситной матрицы с дисперсными карбидными включениями.

Представленные в табл. 2 данные показывают, что в результате закалки размер включений карбидов уменьшался по всему объему образцов. Визуальная оценка количества карбидных включений позволяет сделать вывод о том, что после закалки их количество возросло. Аналогичные закономерности проявляются и при рассмотрении количества и размеров карбидных включений в композиционном материале (особенно это проявляется в слоях, образованных сталью Uddeholm Elmax).

По данным панорамных снимков можно судить о том, что и до, и после закалки образцы композиционного материала имеют слоистую структуру. На микро-

Т а б л и ц а 2

#### Размер частиц карбидов

Table 2. Carbide particles size

Материал	Число измерений	Средний размер, мкм	Стандартное отклонение, мкм	Доверительный интервал, мкм	Относительная точность, %
Сталь Uddeholm Elmax	150	2,76	0,82	0,130	4,71
	150	2,51	0,59	0,097	3,86
Композит ZDI-E					
Слой на основе AISI420MoV (светлый/темный)	50	4,65	1,84	0,53	11,40
	70	4,56	1,35	0,32	7,02
Слой на основе Uddeholm Elmax (темный/светлый)	53	4,61	1,20	0,33	7,16
	56	3,44	1,41	0,38	11,05

П р и м е ч а н и е: числитель и знаменатель – до и после термической обработки.

Т а б л и ц а 3

#### Твердость исследуемых образцов

Table 3. Hardness of the samples

Образец	Твердость после отжига, HRC	Закалка		Твердость после отпуска, HRC	Отпуск	
		T, °C	Условия		T, °C	Условия
Uddeholm Elmax	20	1050	Выдержка 10 мин. Закалочная среда – воздух	60	180	Выдержка 90 мин. Охлаждение на воздухе
ZDI-E	22	1000		56	180	
		1050		61	180	
		1100		59	450	

фотографиях исследуемой композиции рассматривается четкая граница между разнородными слоями, отсутствие переходных слоев. Металлографическим исследованием установлено, что поверхность всех изученных образцов сплошная, трещины и поры отсутствуют. Это позволяет сделать вывод об удовлетворительном качестве соединения слоев.

Исследования показали, что образцы композиционного материала в состоянии после отжига состоят из феррита и дисперсных частиц карбидов. Слои (Uddeholm Elmax и AISI420MoV) отличаются количеством таких частиц. После закалки в слоях обоих типов наблюдается закалочный мартенсит.

При этом происходящие превращения не сказываются на качестве соединения слоев, что особенно важно с точки зрения дальнейшего использования материала.

Максимальная твердость образцов композита достигается при режиме термической обработки, который включает температуры закалки и отпуска 1050 и 180 °C соответственно.

Результаты исследования микротвердости слоев ZDI-E показали, что термическая обработка способствовала увеличению твердости слоев стали обоих типов. Показано, что хотя до термической обработки слоистая структура композита была более уязвима к коррозионному поражению, чем сплав Uddeholm Elmax, разница в коррозионной стойкости термически обработанных материалов практически отсутствует.

## Выводы

В процессе исследования были изучены структуры инструментальной порошковой стали Uddeholm Elmax, а также композиционного материала на основе этой стали после отжига и после закалки и отпуска металла. Показано, что композиционный материал имеет выраженную слоистую структуру с резким переходом от одного слоя к другому. Используемая при производстве композита технология обеспечивает практическое отсутствие переходной зоны и при этом отсутствие дефектов (расслоений, пор, оксидных включений и т.п.) диффузионной сварки. Установлено, что при термической обработке размер включений карбидов уменьшается, а их количество увеличивается. Выявлено, что рассматриваемые структурные превращения приводят к увеличению поверхностной твердости композиционного материала. Выполнено исследование коррозионной стойкости, а также микротвердости отдельных слоев ZDI-E. Результаты работы позволили рекомендовать режим термической обработки изученной композиции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуревич Ю.Г. Булат. Структура, свойства и секреты изготовления. – Курган: изд. Курганского государственного университета, 2006. – 158 с.
2. Sache M. Damascus Steel: Myth, History, Technology, Applications. Stahleisen Communications; 3rd Edition (English edition). 2008. – 304 p.
3. Löbach G. Damascus Steel: Theory and Practice. Schiffer Publishing, Atglen, PA. 2012. – 176 p.
4. Verhoeven J.D. The Mystery of Damascus Blades // Scientific American. 2001. Vol. 284. No 1. P. 74 – 79.
5. Wadsworth J. Archeometallurgy related to swords // Materials Characterization. 2015. Vol. 99. P. 1 – 7.
6. Verhoeven J.D., Pendray A.H., Dauksch W.E. The key role of impurities in ancient damascus steel blades // JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 1998. Vol. 50. No. 9. P. 58 – 64.
7. Kochmann W. Nanowires in ancient Damascus steel // Journal of Alloys and Compounds. 2004. Vol. 372. P. 15 – 19.
8. Verhoeven J.D., Pendray A.H. Experiments to reproduce the pattern of Damascus steel blades // Materials Characterization. 1992. Vol. 29. No. 2. P. 195 – 212.
9. Verhoeven J.D., Jones L.L. Damascus steel, part II: Origin of the damask pattern // Metallography. 1987. Vol. 20. No. 2. P. 153 – 180.
10. Verhoeven J.D., Baker H.H., Peterson D.T., Clark H.F., Yater W.M. Damascus steel. Part III: The Wadsworth-Sherby mechanism // Materials Characterization. 1990. Vol. 24. No. 3. P. 205 – 227.
11. Grazi F., Barzagli E., Scherillo A., De Francesco A., Williams A., Edged D., Zoppi M. Determination of the manufacturing methods of Indian swords through neutron diffraction // Microchemical Journal. 2016. Vol. 125. P. 273 – 278.
12. Гуревич Ю.Г. Классификация булата по макро- и микроструктуре // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 2. С. 3 – 7.
13. Schastlivtsev V.M., Gerasimov V.Yu., Rodionov D.P. Structure of three Zlatoust bulats (Damascus-steel blades) // Physics of Metals and Metallography. 2008. Vol. 106. No. 2. P. 179 – 185.
14. Kobasko N.I. An explanation of possible Damascus steel manufacturing based on duration of transient nucleate boiling process and prediction of the future of controlled continuous casting // International Journal of Mechanics. 2011. Vol. 5. No. 3. P. 182 – 190.
15. Sherby O.D., Wadsworth J. Damascus Steel // Scientific American. 1985. Vol. 25. No. 2. P. 112 – 120.
16. Sukhanov D.A. Damask Steel – Unalloyed Carbide Class Steel // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 1 – 2. P. 149 – 153.
17. Taleff E.M., Bramfitt B.L., Syn C.K., Lesuer D.R., Wadsworth J., Sherby O.D. Processing, structure, and properties of a rolled, ultrahigh-carbon steel plate exhibiting a damask pattern // Materials Characterization. 2001. Vol. 46. No. 1. P. 11 – 18.
18. Černý M., Filípek J., Mazal P., Dostál P. Basic mechanical properties of layered steels // Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun. 2013. Vol. 61. P. 25 – 38.
19. Mogilevsky M.A. Cast ultrahigh carbon steel with Damascus – type microstructure // Materials Technology. 2005. Vol. 20. No. 1. P. 12 – 14.
20. Марьянко А.А. Современная дамасская сталь // Прорез. 2000. № 1. С. 44 – 49.
21. Диффузионная сварка материалов. Справочник / Под ред. Н.Ф. Казакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.

Поступила в редакцию 14 марта 2018 г.

После доработки 6 июля 2018 г.

Принята к публикации 28 января 2019 г.

## EFFECT OF THERMAL PROCESSING ON PARTICLE SIZE OF CARBIDE PHASE, HARDNESS AND CORROSION RESISTANCE OF MULTILAYER COMPOSITE MATERIAL, BASED ON UDDEHOLM ELMAX AND AISI420MoV STEELS

A.N. Dil'din<sup>1</sup>, V.Y. Gerasimov<sup>2</sup>, E.A. Trofimov<sup>1</sup>, M.A. Matveeva<sup>1</sup>, I.V. Muzafarova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

<sup>2</sup>LLC "Company "A&R", Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

**Abstract.** The urgent task is the development of reliable and durable composite materials, manufactured from various components in terms of properties. Multilayered steel is among these materials. The alternation of a large number of heterogeneous layers makes it possible to obtain a complex of properties unattainable for homogeneous steel. To create a series of composite materials for the production of cutting tools based on instrumental powder steels (in particular, Uddeholm Elmax steel), the use of diffusion welding is possible. Study of the effect of heat treatment modes on the structure and performance properties of a multilayer composition based on Uddeholm Elmax and low-carbon stainless AISI420MoV steel has become the goal of this paper. The structures of initial steels and composite material after annealing, and then after quenching and tempering were studied. Metallographic examination of the samples was carried out with the help of "Thixomet" image analyzer. The structure of all samples was considered in the longitudinal section. A general view of the samples surface was investigated for the presence of any defects and nonmetallic inclusions. For this, panoramic images of the samples were considered. Carbide particle size measurements were also performed and the layers width in the multilayer composition was measured. It is shown that the material studied has a pronounced layered structure with a sharp transition from one layer to the next one. Technology used in the production of the composite material ensures that there is no transition zone between the layers. Also, there were no typical defects of diffusion welding – bundles, pores, oxide inclusions. It was established that during thermal processing the size of carbides inclusions in the structure of the composite material decreases, and their number increases. The layers formed by Uddeholm Elmax and AISI420MoV are distinguished by the number of such inclusions. The structural transformations occurring during thermal processing lead to an increase in the surface hardness (according to Rockwell) of the material under investigation. A study was also made of the corrosion resistance and microhardness of the composite material. The results of the work made it possible to recommend a heat treatment regime for the composition studied.

**Keywords:** composite materials, structure, heat treatment, performance characteristics.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-461-466

### REFERENCES

- Gurevich Yu.G. *Bulat. Struktura, svoistva i sekrety izgotovleniya* [Damascus steel. Structure, properties and secrets of manufacturing]. Kurgan: izd. Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006, 158 p. (In Russ.).
- Sache M. *Damascus Steel: Myth, History, Technology, Applications*. Stahleisen Communications; 3rd Edition. 2008, 304 p.
- Löblich G. *Damascus Steel: Theory and Practice*. Schiffer Publishing, Atglen, PA. 2012, 176 p.
- Verhoeven J.D. The mystery of Damascus blades. *Scientific American*. 2001, vol. 284, no. 1, pp. 74–79.
- Wadsworth J. Archeometallurgy related to swords. *Materials Characterization*. 2015, vol. 99, pp. 1–7.
- Verhoeven J.D., Pendray A.H., Dauksch W.E. The key role of impurities in ancient damascus steel blades. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 1998, vol. 50, no. 9, pp. 58–64.
- Kochmann W. Nanowires in ancient Damascus steel. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004, vol. 372, pp. 15–19.
- Verhoeven J.D., Pendray A.H. Experiments to reproduce the pattern of Damascus steel blades. *Materials Characterization*. 1992, vol. 29, no. 2, pp. 195–212.
- Verhoeven J.D., Jones L.L. Damascus steel, part II: Origin of the damask pattern. *Metallography*. 1987, vol. 20, no. 2, pp. 153–180.
- Verhoeven J.D., Baker H.H., Peterson D.T., Clark H.F., Yater W.M. Damascus steel. Part III: The Wadsworth-Sherby mechanism. *Materials Characterization*. 1990, vol. 24, no. 3, pp. 205–227.
- Grazzi F., Barzagli E., Scherillo A., De Francesco A., Williams A., Edged D., Zoppi M. Determination of the manufacturing methods of Indian swords through neutron diffraction. *Microchemical Journal*. 2016, vol. 125, pp. 273–278.
- Gurevich Yu.G. Classification of Damascus steel according to macro- and microstructure. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2007, no. 2, pp. 3–7. (In Russ.)
- Schastlivtsev V.M., Gerasimov V.Yu., Rodionov D.P. Structure of three Zlatoust bulats (Damascus steel blades). *Physics of Metals and Metallography*. 2008, vol. 106, no. 2, pp. 179–185.
- Kobasko N.I. An explanation of possible Damascus steel manufacturing based on duration of transient nucleate boiling process and prediction of the future of controlled continuous casting. *International Journal of Mechanics*. 2011, vol. 5, no. 3, pp. 182–190.
- Sherby O.D., Wadsworth J. Damascus steel. *Scientific American*. 1985, vol. 25, no. 2, pp. 112–120.
- Sukhanov D.A. Damask steel – unalloyed carbide class steel. *Metalurgist*. 2014, vol. 58, no. 1–2, pp. 149–153.
- Taleff E.M., Bramfitt B.L., Syn C.K., Lesuer D.R., Wadsworth J., Sherby O.D. Processing, structure, and properties of a rolled, ultrahigh-carbon steel plate exhibiting a damask pattern. *Materials Characterization*. 2001, vol. 46, no. 1, pp. 11–18.
- Černý M., Filípek J., Mazal P., Dostál P. Basic mechanical properties of layered steels. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2013, vol. 61, pp. 25–38.
- Mogilevsky M.A. Cast ultrahigh carbon steel with Damascus – type microstructure. *Materials Technology*. 2005, vol. 20, no. 1, pp. 12–14.
- Mar'yanko A.A. Modern Damask steel. *Prorez*. 2000, no. 1, pp. 44–49.
- Diffuzionnaya svarka materialov: Spravochnik* [Diffusion welding of materials: Reference book]. Kazakov N.F. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 271 p.

### Information about the authors:

A.N. Dil'din, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (andildin@mail.ru)  
V.Yu. Gerasimov, Deputy General Director, Chief of the Forging Plant (v\_u\_gerasiv@mail.ru)

E.A. Trofimov, Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (tea751@gmail.com)

M.A. Matveeva, Engineer of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (26mist26@gmail.com)

I.V. Muzafarova, MA Student of the Chair "Technique and Technology of Materials Production" (irinaa\_93@mail.ru)

Received March 14, 2018

Revised July 6, 2018

Accepted January 28, 2019