

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

УДК 669.187.56;621.785.52;621.785.53  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-51-59>

Поступила в редакцию 19.10.2018  
Received 19.10.2018

**П. А. Витязь<sup>1</sup>, В. И. Моисеенко<sup>2</sup>, А. Г. Сидоренко<sup>2</sup>, М. В. Сотников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА НА СВОЙСТВА  
ЦЕМЕНТИРОВАННЫХ И АЗОТИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**Аннотация.** Осуществлен анализ влияния структуры стали электрошлакового переплава (ЭШП) на свойства цементированных и азотированных поверхностей деталей машин. Отмечено, что при использовании ЭШП достигается наибольшая эффективность упрочнения зубьев зубчатых колес как цементацией, так и ионным азотированием. Литая сталь, закристаллизовавшаяся в водоохлаждаемой металлической форме, обладает не только повышенной прочностью (по сравнению с прокатом), но и ускоренной диффузией углерода при цементации и азота при азотировании. Обнаруженные закономерности обусловлены более равномерной структурной и химической однородностью приграничных объемов зерна, в формировании которых особая роль отводится примесной меди. Равномерная концентрация меди в указанных объемах стали ЭШП не только снижает склонность материала к локализации пластической деформации при его деформировании, но и способствует более эффективному формированию упрочненного слоя при азотировании и цементации деталей. Отмеченные особенности являются основой повышения несущей способности крупногабаритных зубчатых колес, получаемых из литых заготовок электрошлакового передела. Проведен комплекс исследований и получены результаты, которые свидетельствуют о том, что управление зернограницными эффектами в стальном современном материале на стадии его кристаллизации может быть существенным фактором повышения характеристик упрочненного слоя при изготовлении цементированных и азотированных зубчатых колес из литых заготовок электрошлакового переплава.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав, структура стали, литая сталь, цементация, азотирование

**Для цитирования:** Влияние структуры стали электрошлакового переплава на свойства цементированных и азотированных поверхностей деталей машин / П. А. Витязь [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 51–59. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-51-59>

**P. A. Vityaz<sup>1</sup>, V. I. Moiseenko<sup>2</sup>, A. G. Sidorenko<sup>2</sup>, M. V. Sotnikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF THE STEEL OF ELECTROSLAG REMELTING ON THE PROPERTIES  
OF CEMENTED AND NITRIDED SURFACES OF MACHINE PARTS**

**Abstract.** The analysis of the influence of electroslag remelting steel structure on the properties of cemented and nitrided surfaces of machine parts is carried out. It is noted that when using electroslag remelting, the greatest efficiency is achieved in the production of large-sized gearwheels, hardened by cementation and ion nitriding. It is shown that cast steel, crystallized in a water cooled crystallizer, has a strength not lower than forged or rolled with significantly lower anisotropy properties and accelerated carbon diffusion when cementation. The discovered patterns are caused by the structural and chemical homogeneity of boundary grain volumes, which formation is affected by copper impurities. Uniform density of copper in the said volumes not only reduces their propensity to localize plastic deformation, but contributes to a higher ability for uniform carburization of these steels in the process of cementation. This causes a change in the main characteristics of the cemented layers and is the basis for increasing the bearing capacity of the gearwheels. The obtained results also testify to the fact that controlling grain-boundary effects in steel material at the stage of crystallization of blanks can be a significant factor in increasing the characteristics of the hardened layer in the manufacture of nitrided gearwheels from cast blanks of the electroslag redistribution.

A set of studies was carried out and results were obtained which indicate that the control of grain boundary effects in modern steel material at the stage of its crystallization may be a significant factor in improving the characteristics of the hardened layer in the manufacture of cemented and nitrated gear wheels from cast billets electros slag remelting.

**Keywords:** electros slag remelting, the structure of steel, cast steel, cementation, nitriding

**For citation:** Vityaz P. A., Moisenko V. I., Sidorenko A. G., Sotnikov M. V. Influence of the structure of the steel of electros slag remelting on the properties of cemented and nitrated surfaces of machine parts. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 51–59 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-51-59>

**Введение.** Особые условия формирования структуры стали в металлических формах при электрошлаковом переплаве (ЭШП) определяют современные тенденции в использовании литья.

Сталь, которая закристаллизовалась в металлическом (как правило, водоохлаждаемом) кристаллизаторе, обладает прочностью не ниже деформированного (кованого или катаного) металла той же марки. Достижимые при этом чистота, плотность и химическая однородность материала открывают новые возможности применения в современных конструкциях машин литых деталей (и заготовок для них) вместо деформированных [1].

Это не только упрощает процесс изготовления изделий, но и позволяет в ряде случаев решать проблемы повышения прочности и ресурса деталей, лимитирующих работоспособность машин. Известна, например, высокая эффективность промышленного использования ЭШП при получении крупногабаритных зубчатых колес сложной формы, упрочняемых цементацией [2, 3]. В [4] показано, что причиной высокой эффективности является не только отмеченная выше повышенная чистота и плотность электрошлакового металла, но и его уникальное свойство – высокое сопротивление зарождению и развитию макролокализации пластической деформации (МЛПД) [5]. Это свойство объясняется с позиций дислокационной теории пластического течения: повышенная химическая однородность стали и, как следствие, большая структурная однородность ее приграничных объемов зерен устраняет (или заметно уменьшает) концентрацию напряжений в зонах, инициирующих микро- и макролокализацию пластической деформации в стальном материале, что приводит к возрастанию его прочности при внешних нагрузках [4].

Кроме того, также предсказано и впервые показано, что скорость диффузии углерода в металле ЭШП (на стадии цементации деталей) выше, чем в обычном металле того же состава [2, 4]. Указанное обстоятельство объясняется тем, что при химико-термической обработке диффузия вдоль границ зерен происходит с гораздо большей скоростью, чем в объеме зерна [4, 6]. При этом существенная роль в скорости насыщения принадлежит концентрации на границах и в приграничных объемах зерен элементов, регулирующих диффузию углерода. Среди таких элементов наибольший интерес представляют медь и ее соединения с никелем [4]. Известно [6], что диффузия углерода и азота через них практически отсутствует.

**Повышение сопротивления стали ЭШП возникновению МЛПД.** В [4] уникальными экспериментами показано, что нагрев стали и обогащение ее свободных поверхностей выделяющейся примесью медью снижают интенсивность выделения на этих поверхностях углерода (табл. 1) [7].

Уменьшение концентрации и концентрационной неоднородности меди и никеля на границах зерен электрошлакового металла способствует как повышению сопротивления МЛПД под нагрузкой, так и получению более эффективного упрочненного слоя деталей при цементации их несущих поверхностей. Последнее, как было установлено [2, 3], определяется более равномерным распределением диффундируемого элемента (углерода) по границам зерен. Это увеличивает эффективную толщину упрочненного слоя и уменьшает градиент изменения твердости в наиболее нагруженных объемах.

В электрошлаковых отливках указанный эффект достигается за счет диспергирования литой столбчатой структуры материала. При этом снижается как средняя величина зернограницной концентрации меди в стали, так и неравномерность этой концентрации по периметру зерен (рис. 1) [5].

Таблица 1. Локальная концентрация углерода и меди на свободной поверхности излома в вакууме  $1 \cdot 10^{-9}$  при нагреве 25–600 °С

Table 1. Local concentration of carbon and copper on the free fracture surface in vacuum  $1 \cdot 10^{-9}$  when heated to 25–600 °С

Марка стали	Изменение интенсивности излучения элементов	
	C	Cu
Сталь 20	44	3
14Х2ГМР	21	11
14ГНМДАФБРТ	8	17

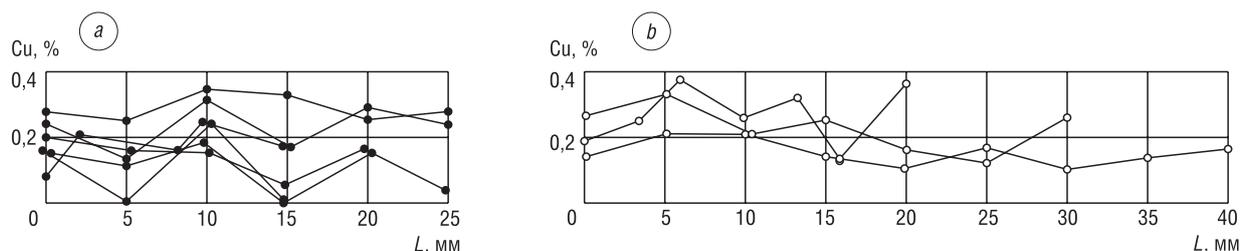


Рис. 1. Распределение меди по периметру границ аустенитных зерен стали 20X2H4A: *a* – прокат, *b* – электрошлаковое литье

Fig. 1. The distribution of copper around the perimeter of the boundaries of austenitic grains of steel 20X2H4A: *a* – rolling, *b* – electroslag casting

Изучение явления повышения сопротивления стали ЭШП возникновению МЛПД проведено по комплексной методике [4], заключающейся в выявлении зон (полос) неомогенной деформации (линии Чернова – Людерса) в стальных образцах (прокат и литье после ЭШП) специальным способом макротравления и исследовании характера деформирования на пределе текучести с использованием диаграмм растяжения.

Приведем результаты нашего исследования на примере стали 20 ЭШП при различном содержании меди, вводимой при переплаве (табл. 2, рис. 2, 3). Отмечается четкая корреляция между картиной деформации Чернова – Людерса, полученной макротравлением, и видом соответствующих кривых деформирования на пределе текучести (рис. 2, 3).

Т а б л и ц а 2. Химический состав образцов стали 20 ЭШП при различном содержании меди, вводимой при переплаве

Table 2. Chemical composition of steel 20 samples with different content of copper introduced during remelting

Партия	Элемент, мас.%						
	C	Si	Mn	Cr	S	Cu	Ni
№ 1 (исходный металл)	0,18	0,14	0,45	0,08	0,012	0,08	0,06
№ 2	0,19	0,18	0,45	0,10	0,012	0,15	0,12
№ 3	0,19	0,22	0,40	0,15	0,012	0,86	0,47

Видно, что даже при аномально высоком содержании меди, равном 0,86 %, не удалось получить развитую картину полос Чернова – Людерса, присущую образцам стали 20 ЭШП аналогичного состава (содержание меди 0,15 %) открытого способа выплавки (рис. 4, *a*). На диаграмме растяжения исходного образца (партия № 1) резкая текучесть («зуб») и площадка текучести отсутствуют, наблюдается лишь небольшой перегиб на кривой упрочнения. То же происходит и при увеличении содержания меди до 0,15 %. Более протяженная площадка текучести без характерного «зуба» наблюдается лишь при содержании меди 0,86 %.

**Влияние ЭШП на свойства цементированных зубчатых колес.** Комплексное исследование литого электрошлакового металла при цементации проведено, в основном, на сталях 20X2H4A и 20XH3A, чаще всего используемых для изготовления крупногабаритных зубчатых колес.

На первом этапе было установлено, что глубина упрочненного слоя при одинаковых режимах цементации образцов стали 20X2H4A, определяемая металлографическим методом как расстояние от поверхности до середины переходной зоны, составляет: в металле электрошлакового литья (ЭШЛ) – 1,05 мм; в прокованном металле, полученном из слитка ЭШЛ, – 0,95 мм; в исходном прокате – 0,85 мм.

Современные подходы к оценке качества и несущей способности цементированных зубчатых колес построены на количественной оценке микротвердости упрочненной поверхности и распределении углерода по глубине слоя, а также по количеству бейнита и остаточного аустенита в цементированной поверхности зуба [8].

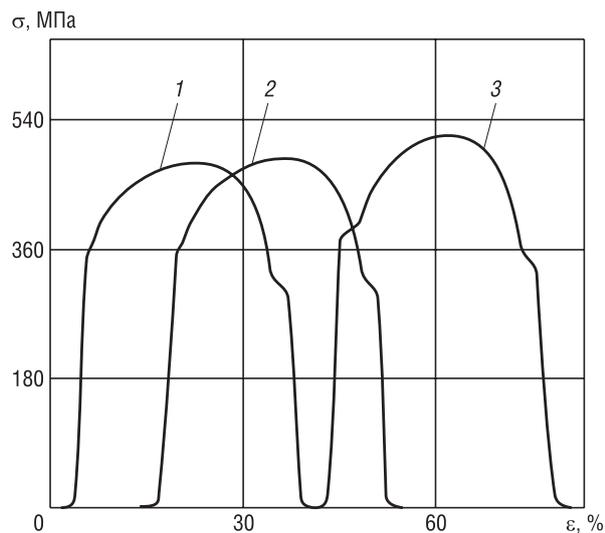


Рис. 2. Общий вид совмещенных диаграмм растяжения образцов стали 20 ЭШП при различном содержании меди, вводимой при переплаве: 1 – Cu = 0,08 % (исходный металл); 2 – Cu = 0,15 %; 3 – Cu = 0,86 %

Fig. 2. General view of the combined diagrams of tensile strain of steel 20 electroslag remelting with different content of copper introduced during remelting: 1 – Cu = 0.08 % (base metal); 2 – Cu = 0.15 %; 3 – Cu = 0.86 %

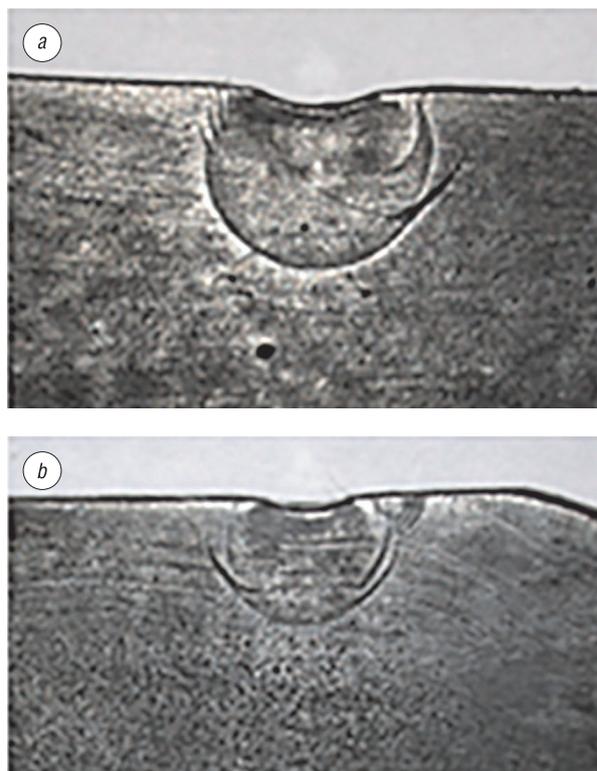


Рис. 3. Общий вид деформации Чернова – Людерса на образцах стали 20 ЭШП при различном содержании меди: a – Cu = 0,15 %; b – Cu = 0,86 %

Fig. 3. General view of Chernov – Luders deformation on steel 20 samples electroslag remelting at different copper contents: a – Cu = 0.15 %; b – Cu = 0.86 %



Рис. 4. Изменение начальных диаграмм растяжения и результаты макротравления образцов стали 20 (Cu = 0,15 %) в зависимости от структурного состояния материала: a – нормализация; b – ЭШП, нормализация; c – нормализация, охлаждение в воде

Fig. 4. Change of initial tension diagrams and results of macro etching of steel 20 samples (Cu = 0.15 %) depending on the structural state of the material: a – normalization; b – electroslag remelting, normalization; c – normalization, cooling in water

Приведенные результаты дополнены исследованиями влияния на параметры цементированного слоя столбчатой и равноосной структуры, сформированной соответственно в периферийном и в центральном объемах слитка ЭШП  $\varnothing 95$  мм, полученного из стали 20ХНЗМА в водоохлаждаемом стальном кристаллизаторе.

Показано, что столбчатая дендритная структура с расстоянием между осями дендритов, равном 0,3–0,5 мм, формируется на глубине до 1,0–1,5 см от поверхности отливки (рис. 5, *a*). В центральной ее части структура состоит из равноосных кристаллов (рис. 5, *b*).

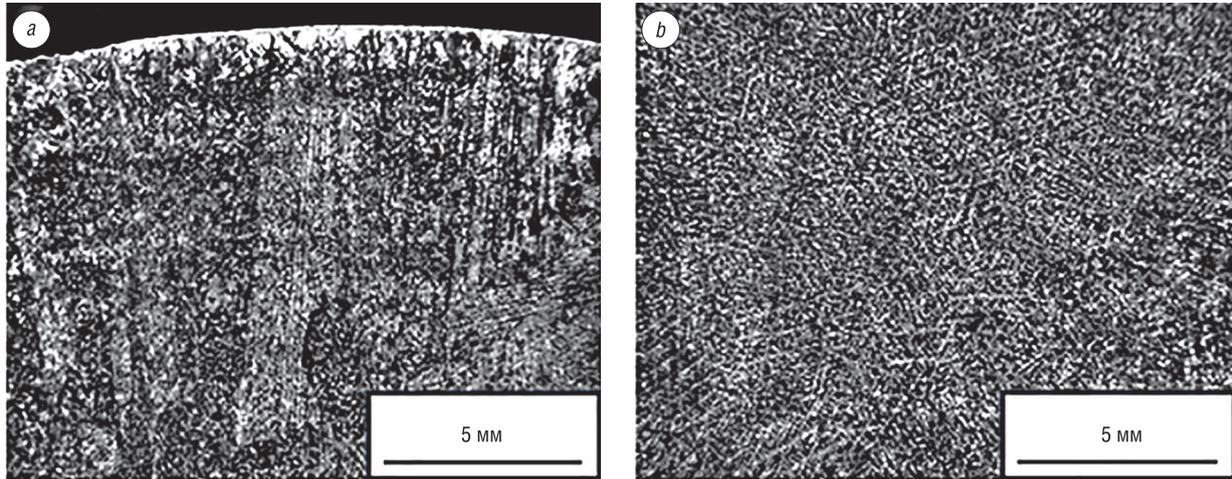


Рис. 5. Макроструктура отливки  $\varnothing 95$  мм из стали 20ХНЗМА ЭШП: *a* – вблизи поверхности, *b* – в центре отливки  
Fig. 5. Macrostructure of casting  $\varnothing 95$  mm from steel 20ХНЗМА by electroslag remelting: *a* – near the surface, *b* – in the center of the casting

Установлено, что показатели микротвердости по толщине цементированного слоя на участках, отстоящих на расстоянии 3 и 45 мм от поверхности отливки, заметно отличаются: в зоне столбчатых кристаллов, как и ожидалось, микротвердость выше, а ее распределение более равномерное, чем в области сердцевины отливки (рис. 6).

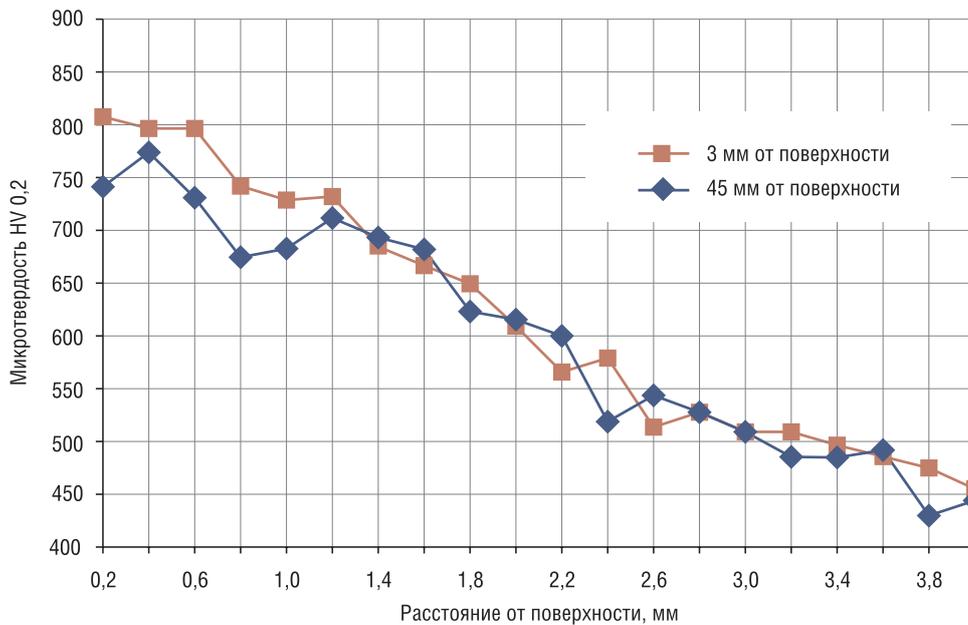


Рис. 6. Распределение микротвердости по упроченному слою образца, вырезанного из слитка  $\varnothing 95$  мм стали 20ХНЗМА ЭШП

Fig. 6. Distribution of microhardness over a hardened layer of a sample cut from ingot  $\varnothing 95$  mm of steel 20ХНЗМА by electroslag remelting

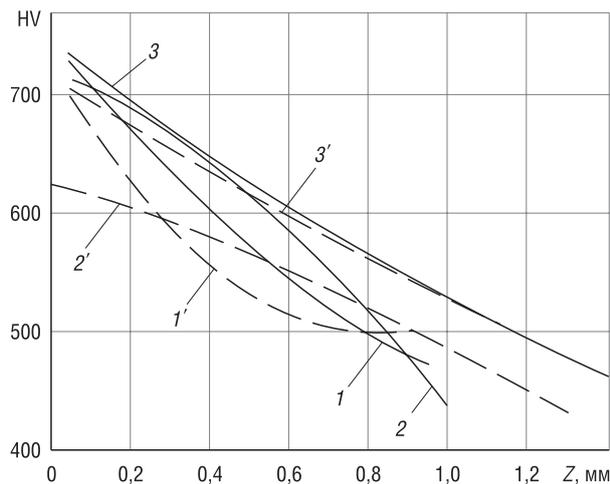


Рис. 7. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя зубьев колес из стали 20X2H4A при различных режимах цементации в зависимости от структурного строения материала [8]: 1 – температура цементации 930 °С, время цементации 8 ч; 2 – температура цементации 960 °С, время цементации 15 ч; 3 – температура цементации 960 °С, время цементации 22 ч (— — ЭШЛ, — — поковка)

Fig. 7. The distribution of microhardness over the thickness of the hardened layer of wheel teeth from steel 20X2H4A with various cementation modes depending on the structural structure of the material [8]: 1 – carburizing temperature 930 °C, carburizing time 8 hours; 2 – carburizing temperature of 960 °C, carburization time 15 hours; 3 – carburizing temperature of 960 °C, carburization time 22 hours (— — electroslag casting — — forging)

ного способа выплавки – на расстоянии 0,5 мм. Если в обычной стали концентрация углерода резко уменьшается по толщине слоя, то для стали ЭШЛ этого не наблюдается. В результате достигается почти одинаковая концентрация углерода (1,0–0,7 %) до половины общей толщины слоя, что обеспечивает высокие служебные свойства упрочненных поверхностей зубьев колес.

Сравнение цементированных слоев зубчатых колес из стали 20X2H4AШ и этой же стали, дополнительно прокованной в поперечном направлении слитков, показало неэффективность деформирования литого электрошлакового металла. Толщина эффективной зоны упрочненного слоя в прокованном металле ЭШП может снижаться на 10–15 % по сравнению с металлом ЭШЛ и даже быть ниже, чем в обычном прокате. Кроме того, отмечается увеличение рассеяния величины эффективной толщины упрочненного слоя [4].

Таким образом, установленные закономерности электрошлакового металла в части уменьшения его структурной и химической неоднородности в присутствии в стали примесной меди позволяют говорить как о снижении в сталях ЭШП их склонности к локализации пластической деформации, так и о более высокой способности к однородному науглероживанию в процессе цементации. Это обуславливает изменение основных характеристик цементированных слоев и является основой для повышения несущей способности зубчатых колес, особенно крупногабаритных, в связи с трудностями получения их заготовок ковкой.

Так как влияние локализации пластической деформации (ЛПД) на сопротивление усталости повышается с увеличением твердости (прочности) стали, уменьшение ее способности к ЛПД предоставляет возможность достижения эффекта повышения сопротивления усталости твердого упрочненного поверхностного слоя в большей степени, чем менее твердых подповерхностных слоев. Указанная особенность рассматривается как новое дополнительное направление повышения прочности поверхностно упрочняемых зубчатых колес [2].

Приведенные особенности формирования упрочненного слоя при цементации электрошлакового металла могут иметь место и при азотировании. Есть основания предполагать, что

Комплексная проверка изменения количественных показателей указанных характеристик после ЭШП проведена на сталях 20X2H4A и 20XНЗА как на образцах размером 10×10×60 мм, так и на зубчатых колесах, изготовленных из слитков ЭШЛ и поковок обычной выплавки, со следующими параметрами:  $m = 3$  мм,  $z = 18$ ;  $m = 4,5$  мм,  $z = 20$ ;  $m = 14$  мм,  $z = 14$ . Газовая цементация указанных образцов проводилась по нескольким вариантам [8].

Исследование микротвердости образцов свидетельствует о том, что расстояние до твердости HV600 у зубьев из литой стали, как правило, на 50–80 % больше, чем у ковальной обычной выплавки (рис. 7). При цементации с более длительной выдержкой, например в течение 22 ч при температуре 960 °С, толщины цементированных слоев у зубьев из металла электрошлакового литья и у зубьев из ковальной обычной выплавки практически одинаковы (рис. 7, кривые 3, 3').

Распределение углерода по толщине слоя также свидетельствует о лучшей способности к цементации электрошлакового металла. При одинаковых условиях обработки концентрация углерода 0,7 % на нижней границе зоны эффективной толщины слоя достигается в металле ЭШЛ на расстоянии 1,0–1,2 мм от поверхности, в то время как в металле обычной

снижение концентрации и неоднородности распределения меди и связанных с нею элементов на границах зерен и в их приграничных объемах будет способствовать получению упрочненных азотированных слоев с более равномерным распределением диффундируемого элемента. Это должно приводить к увеличению эффективной толщины слоя и уменьшению градиента изменения твердости в наиболее нагруженных поверхностных объемах деталей.

**Влияние ЭШП на свойства азотированных зубчатых колес.** Отличительные качества и особенности формирования упрочненного слоя при азотировании изучены нами на образцах стали 40ХМФА (ТУ 1–806–1184–2013), полученных в водоохлаждаемом стальном кристаллизаторе Ø220 мм (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Химический состав стали 40ХМФА

Table 3. Chemical composition of steel 40ХМФА

Марка стали	Массовая доля элемента, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	S	P	V
40ХМФА	0,42	0,27	0,61	1,12	0,12	0,24	0,14	0,015	0,020	0,06

Примечание. Допускаемые отклонения по химическому составу элементов должны соответствовать п. 2.4 ГОСТ 4543.

Одну часть образцов стали 40ХМФА ЭШП, взятых из средней части отожженного после улучшения слитка, подвергали ионному азотированию, другую – ковке с получением заготовок, прошедших аналогичную термическую и химико-термическую обработку (улучшение и ионно-плазменное азотирование). Проведенные исследования показали, что максимального увеличения глубины упрочненного ионно-плазменным азотированием слоя удастся достичь на образцах стали 40ХМФА ЭШП, которые выделены из поверхностных слоев слитка и отличаются мелкодисперсной литой структурой, сформированной преимущественно из дендритов первого порядка.

Последующая ковка электрошлакового металла, приводит к снижению однородности распределения меди и связанных с нею элементов по границам зерен, оказывает существенное влияние на параметры азотированного слоя в сторону их снижения (табл. 4, рис. 8).

Т а б л и ц а 4. Параметры упрочненного слоя образцов стали 40ХМФА после ионно-плазменного азотирования

Table 4. Parameters of the hardened layer of steel samples 40ХМФА after ion-plasma nitriding

№ образца	Исходный материал	Термообработка образцов	Твердость сердцевины, НВ	Твердость азотированной поверхности, HV <sub>5</sub>	Толщина азотированного слоя, мм	ε-фаза, мкм
1	Литая заготовка ЭШП	Отжиг, улучшение, ионно-плазменное азотирование	272	До 640	0,50–0,55	≤ 3,0
2	Литая заготовка ЭШП + ковка	Отжиг, улучшение, ионно-плазменное азотирование	276	≤ 635	≤ 0,45	≤ 3,0

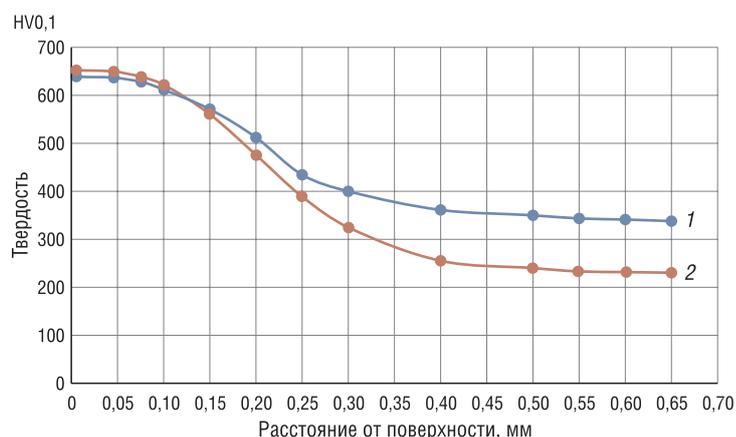


Рис. 8. Распределение микротвердости на образцах стали 40ХМФА после ионно-плазменного азотирования: 1 – после ЭШП; 2 – ЭШП + ковка

Fig. 8. Microhardness distribution on steel samples of 40ХМФА after ion-plasma nitriding: 1 – is after electroslag remelting; 2 – electroslag remelting + forging

**Заключение.** Проведенный комплекс исследований и полученные результаты свидетельствуют о том, что управление зернограничными эффектами в стальном современном материале на стадии его кристаллизации может быть существенным фактором повышения характеристик упрочненного слоя при изготовлении цементированных и азотированных зубчатых колес из литых заготовок ЭШП. Литая сталь, закристаллизовавшаяся в водоохлаждаемой металлической форме, обладает не только повышенной прочностью (по сравнению с прокатом), но и ускоренной диффузией углерода при цементации и азота при азотировании.

Наши исследования и полученные результаты нашли свое применение в производстве ОАО «БЕЛАЗ». Также стоит отметить, что из существующих на ОАО «БЕЛАЗ» литейных технологий наиболее приемлемые результаты по достижению химической однородности материала по его объему и границам зерен достигаются в стальных электрошлаковых отливках за счет диспергирования литой структуры металла.

### Список использованных источников

1. Патон, Б. Е. Электрошлаковый металл / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар. – Киев: Наук. думка, 1981. – 680 с.
2. Важник, Л. Н. Повышение сопротивления усталости цементованных зубчатых колес смещением очага разрушения под поверхность / Л. Н. Важник // Вестн. машиностроения. – 1987. – № 9. – С. 6–11.
3. Моисеенко, В. И. Управление структурной однородностью и равнопрочностью конструкционных сталей и деталей машин / В. И. Моисеенко, П. Л. Мариев // Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения: материалы 54-й междунар. науч.-техн. конф.: в 10 ч. – Минск: БГПА, 2000. – Ч. 5. – С. 51–59.
4. Моисеенко, В. И. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / В. И. Моисеенко, П. Л. Мариев. – Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 200 с.
5. Куслицкий, А. Б. Неметаллические включения и усталость стали / А. Б. Куслицкий. – Киев: Техника, 1976. – 125 с.
6. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник / М. Е. Дриц [и др.]. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
7. Мариев, П. Л. Повышение конструкционной равнопрочности крупногабаритных деталей и сварных узлов карьерных самосвалов / П. Л. Мариев. – Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. – 180 с.
8. Сусин, А. А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А. А. Сусин. – Минск: Беларус. навука, 1999. – 175 с.

### References

1. Paton B. E., Medovar B. I. *Electroslag Metal*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 680 p. (in Russian).
2. Vazhnik L. N. Increase of fatigue resistance of cemented gearwheels by displacement of the source of destruction under the surface. *Vestnik mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], 1987, no 9, pp. 6–11 (in Russian).
3. Moiseenko V. I., Mariev P. L. Control of structural uniformity and equal strength of structural steels and machine components. *Vklad vuzovskoi nauki v razvitie prioritetnykh napravlenii proizvodstvenno-khoziaistvennoi deiatel'nosti, razrabotku ekonomichnykh i ekologicheski chistykh tekhnologii i progressivnykh metodov obucheniia: materialy 54-i mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Chast' 5* [The Contribution of University Science to the Development of Priority Areas of Production and Economic Activities, the Development of Economical and Environmentally Friendly Technologies and Progressive Methods of Teaching: Materials of the 54<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference. Part 5]. Minsk, Belorussian State Polytechnic Academy, 2000, pp. 51–59 (in Russian).
4. Moiseenko V. I., Mariev P. L. *Fundamentals of Structural Equal Strength of Steel and Elements of Large-Sized Machine Components*. Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the National Academy of Science of Belarus, 1999. 200 p. (in Russian).
5. Kuslickij A. B. *Nonmetallic Inclusions and Fatigue of Steel*. Kiev, Tekhnika Publ., 1976. 125 p. (in Russian).
6. Drits M. E., Bochvar N. R., Guzei L. S., Lysova E. V., Padezhnova E. *Dual and Multi-Component Systems Based on Copper: Handbook*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 248 p. (in Russian).
7. Mariev P. L. *Increasing the Structural Equal Strength of Large-Sized Parts and Welded Assemblies of Quarry Dump Trucks*. Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the National Academy of Science of Belarus, 2001. 180 p. (in Russian).
8. Susin A. A. *Chemical-Thermal Hardening of Highly Stressed Parts*. Minsk, Belarускаia navuka Publ., 1999. 175 p. (in Russian).

**Информация об авторах**

*Витязь Петр Александрович* – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель Аппарата Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

*Моисеенко Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ks\_oim@tut.by

*Сидоренко Александр Георгиевич* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ks\_oim@tut.by

*Сотников Максим Владимирович* – младший научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ks\_oim@tut.by

**Information about the authors**

*Pyotr A. Vitiaz* – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Academy Staff of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vitiaz@presidium.basnet.by

*Vladimir I. Moiseenko* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ks\_oim@tut.by

*Aleksandr G. Sidorenko* – Ph. D. (Engineering), Head of Laboratory, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ks\_oim@tut.by

*Maksim V. Sotnikov* – Junior Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ks\_oim@tut.by