



Aleksandr N. Dubovoy
Дубовой
Александр
Николаевич

УДК 629.5.001
К 68

THE 18H2N4MA STEEL STRENGTH CHARACTERISTICS INCREASE

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 18Х2Н4МА

DOI 10.15589/SMI. 2015.01.06

Aleksandr N. Dubovoy А. Н. Дубовой, д-р техн. наук, проф.
oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-2843-1879

Gennadiy V. Volkov Г. В. Волков, канд. техн. наук, доц.
volcovgv@gmail.com
ORC ID: 0000-0002-3045-4498

Aleksandr A. Zhdanov А. А. Жданов, асп.
oleksandr.zhdanov@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0003-1967-7233



Gennadiy V. Volkov
Волков
Геннадий
Васильевич

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаєв

Abstract. The article considers the impact of prerecrystallization heat treatment on the hardness, strength and fatigue strength of the 18H2N4MA steel after preliminary shot blasting. It is experimentally established that as the result of prerecrystallization heat treatment at 500 °C with 3 minutes delay the layer with an increased measure of hardness (hardness is increased by 42 %) is formed on the 18H2N4MA steel surface after the preliminary shot blasting. The 18H2N4MA steel shot blasting causes the formation of compressive stresses in the surface layer, the subsequent prerecrystallization heat treatment does not change the nature of the residual stress, but only leads to the decrease in the absolute values, preserving the work-hardened layer depth. The prerecrystallization heat treatment leads to an increase in fatigue strength of the 18H2N4MA steel about 2.7 times compared with the shot blasting and increase of the tensile strength by 11 %, with plasticity indexes substantially constant. Such an increase in the strength indicators of the 18H2N4MA steel as a result of prerecrystallization heat treatment is caused by the formation of the substructures with shredded precinct in the steel surface layer. The given assumption is confirmed by the X-ray diffraction and electron metallography results. After prerecrystallization heat treatment the partial subgrains grinding from 222 ÷ 133 nm after shot blasting to 90 ÷ 49 nm is observed in the 18H2N4MA steel structure.

Keywords: plastic deformation; recrystallization heat treatment; fatigue strength; hardness; substructure.

Аннотация. Исследовано влияние передкристаллизационной термической обработки на предел прочности, твердость и усталостную прочность стали 18Х2Н4МА после дробеструйной обработки.

Ключевые слова: пластическая деформация; передкристаллизационная термическая обработка; прочность; твердость; усталостная прочность; субструктура.

Анотація. Досліджено вплив передкристалізаційної термічної обробки на межу міцності, твердість і втомну міцність сталі 18Х2Н4МА після дробеструминної обробки.

Ключові слова: пластична деформація; передкристалізаційна термічна обробка; міцність; твердість; утомна міцність; субструктура.

References

Ponomarenko I. V., Dyachenko S. S., Doshchechkina Y. V., Kondratenko Y. Y. Vliyanie razlichnykh metodov poverkhnostnogo uprochneniya na ustalostnuyu prochnost [The Effect of Different Methods of Surface Hardening on the Fatigue Strength]. *Vestnik KHNADU* [Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University], 2006.

Doshchechkina Y. V., Diachenko S. S., Ponomarenko Y. V., Aksonova S. Y., Lobanov V. K. Vplyv poverkhnoveho zmitsnennia na mekhanichni vlastyvyosti vyrobiv [The Influence of Surface Hardening on the Mechanical Properties of Products]. *Zbirnyk naukovykh prats Avtomobilnyi transport* [Collection of scientific publications Automobile transport], 2005, no. 16, pp. 79–82.



Aleksandr A. Zhdanov
Жданов
Александр
Александрович

Dubovyi O.M., Kulik S.H., Zhdanov O.O., Bobrov M.M., Myrko O.Y. Vplyv deformatsii ta lehuiuchykh elementiv na tverdist stali i napylenykh pokryttiv pislia peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky [The Effect of Strain and Alloying Elements on the Hardness of Steel and Sputtered Coatings after Prorecrystallization Heat Treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2011, no.2, pp. 36–44.

Gorelik S.S., Dobatkina S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Metals and Alloys Recrystallization]. Moscow, MISIS Publ., 2005. 432 p.

Gorelik S.S., Rastorguev L.N., Skakov Yu.A. *Rentgenograficheskyy i elektronnoopticheskyy analiz* [X-ray and Electron-Optical Analysis]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 336 p.

Gusev A.Y., Kurlov A.S. Attestatsiya nanokristallicheskikh materialov po razmeru chastits (zeren) [Certification of Nanocrystalline Materials According to the Particles Size]. *Metallofizika i noveishiye tekhnologii — Metal physics and advanced technologies*, 2008 vol. 30, no. 5, pp. 679–694.

Dubovyi O.M., Lebedeva N.Yu. Yankovets, T.A., Karpechenko A.A. Zhdanov O.O. Doslidzhennia mozhlyvosti pidvyshchennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvosti deformovanykh metaliv i splaviv termichnoiu obrobkoiu [Research of Opportunities to Improve the Physical and Mechanical Properties of Metals and Alloys Deformed by Heat Treatment]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK* [Collection of Scientific Publications of NUS], 2010, vol. 3, no. 432, pp. 69–79.

Dubovyi O.M., Lebedeva N.Yu., Yankovets T.A. Vplyv peredrekrystalizatsiinoi termichnoi obrobky na fizyko-mekhanichni vlastyvosti napylenykh pokryttiv ta deformovanykh metaliv ta splaviv [The Effect of Prorecrystallization Heat treatment on Physical and Mechanical Properties of Sputtered Coatings and Deformed Metals and Alloys]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv* [Metallurgy and metal processing], 2010, no. 3, pp. 7–10.

Papshev D.D. *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostnoy plasticheskoy deformatsiyei* [Finishing and Reinforcement Treatment of Surface Plastic Deformation], Moscow, Mashinobuduvannia Publ., 1978. 152 p.

Dubovyi O.M., Yankovets N.Yu., Lebedeva Yu.O., Kazimirenko Yu.O., Zhdanov O.O., Bobrov M.M. *Sposib deformatsiino-termichnoi obrobky metaliv ta splaviv* [Means of Deformation and Heat Treatment of Metals and Alloys] Patent UA, no. 95378, 2010.

Poliak M.S. *Tekhnolohiia zmitsnennia. Tekhnolohichni metody zmitsnennia* [Strengthening Technology. Technological Methods of Strengthening]. Moscow, Mashynobuduvannia Publ., 1995. 688 p.

Sindo D., Oikava T. *Analiticheskaya prosvetivayushchaya elektronnaya, monograph* [Analytical Transmission Electron Microscopy]. Moscow, Tekhnofera Publ., 2006. 246 p.

Terentev V.F., Baykova A.A. Tsiklicheskaya prochnost submikro- i nanokristallicheskikh metallov i splavov [Cyclic Strength of Submicron and Nanocrystalline Metals and Alloys (Review)]. *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashinobuduvanni — New materials and technologies in metallurgy and engineering*, 2010, no.1, pp. 8–24.

Problem statement. Most failures of machines and mechanisms in operation are related to the strength issues and caused by fatigue defects. Fatigue resistance of many details operating under normal conditions is determined by the surface layer strength. Therefore, the problem of the formation of the surface layer of the detail with high bearing capacity should be solved at the stage of the design of a structure, and then in the technological process development [4]. The most promising method of strengthening of heavily loaded details is a complex treatment. It includes the chemical and heat treatment (cementation, azotization) followed by shot blasting, rolling, coining with special panes, etc. Manufacturing practice showed that shot blasting is the most effective work hardening in the mass production of details. The advantage of this method is the possibility of strengthening of details of various shapes and sizes, complete mechanization of the process of strengthening, the high efficiency and the relatively low special equipment costs. The shot blasting increases the rupture strength under the shock and cyclic loads of low-alloyed steels by 30–35%, extending the time before fatigue flaking [1].

Постановка проблемы. Большинство отказов машин и механизмов в процессе эксплуатации связаны с проблемами прочности и вызваны усталостными дефектами. Сопротивление усталости многих деталей, работающих при нормальных условиях, определяется прочностью поверхностного слоя, поэтому проблема формирования поверхностного слоя детали с высокой несущей способностью должна решаться уже на стадии проектирования конструкции, а затем — и при разработке технологического процесса [2]. Наиболее перспективным методом упрочнения тяжело нагруженных деталей является комплексная обработка — химико-термическая обработка (цементация, азотирование) с последующим деформационным упрочнением дробью, обкаткой роликами, чеканкой специальными бойками и т. п.

Заводская практика показала, что в условиях массового производства деталей наиболее результативное деформационное упрочнение — наклеп дробью. Преимуществом данного способа является возможность упрочнения деталей различной формы и размеров, полной механизации процесса упрочнения, высокая производительность и относительно низкие затраты на специальное оборудование. Деформационное упрочнение дробью повышает сопротивление

The increase of the strength characteristics of construction steels is usually accompanied by the decrease of the parameters defining the viscosity and plasticity of the material. In this case, a high strength material may be damaged under low loading due to the formation of cleavage cracks in it. Consequently, it is usually impossible to assess the reliability of steel products with any mechanical characteristic. It is defined by a set of mechanical properties which are closely connected to the operational strength of the products.

Latest research and publications analysis. The results of the studies on the impact of the prerecrystallization heat treatment on the hardness of metals and alloys subjected to the plastic deformation [5–7, 9] enabled predicting its positive impact on the strength properties of the metals and alloys. Nevertheless, the problem of obtaining the experimental data on the impact of the prerecrystallization heat treatment on the ultimate strength limit and fatigue strength of metal construction materials is urgent.

THE ARTICLE AIM is to study the impact of the prerecrystallization heat treatment on the 18H2N4MA steel strength characteristics after shot blasting.

Basic material. The 18H2N4MA (GOST 4543) steel samples were being treated with the 1.4–1.6 mm (GOST 3722) steel shot on the N-0410 plant for 60 minutes under a pressure of 0.2 MPa. The surface roughness after the shot blasting made up $R_a = 2.5$. Fatigue testing of the samples was performed at the central laboratory of the GTRPC “Zorya–Mashproekt” according to the GOST 23026-78 on the standard samples with a frequency of 685 cycles per minute (11.4 Hz). Testing base made up 107 cycles. The initial load on the sample was 140 MPa, while the load increase step was 20 MPa. The identification of the ultimate stress limit was performed according to the GOST 1497-84 on a tensile testing machine IR-5057-50 under a load of 5 tons with a loading rate of 0.5 mm/min. The prerecrystallization heat treatment was performed in the electrical furnace SNOL-1.6.2.0.08/9-M1 at a temperature of 500 °C with a 3 minute hold at the same temperature according to the recommendations of [5]. The microhardness was determined with the PMT-3 tool (on longitudinal sections) with an indentation load of 20 g according to the DSTU ISO 6507-4: 2008. The analysis of the microstructure was performed on the PEM-100M electron microscope with the replica method [12]. The mean effective size of the coherent scattering regions (CSR) was determined with the approximation method from two orders of diffraction in the [110] and [211] direction with a linear combination of Gaussian functions.

разрушению при ударно-циклических нагрузках низколегированных сталей на 30...35%, увеличивает время до появления усталостной трещины [4]. Повышение прочностных характеристик конструкционных сталей, как правило, сопровождается ухудшением параметров, определяющих вязкость и пластичность материала. В этом случае высокопрочный материал может разрушаться при малых нагрузках вследствие образования в нем хрупкой трещины. В связи с этим надежность стальных изделий, как правило, нельзя оценить какой-либо механической характеристикой, она определяется комплексом механических свойств, находящихся в тесной взаимосвязи с эксплуатационной прочностью изделий.

Анализ последних исследований и публикаций. Результаты исследований влияния предрекристаллизационной термической обработки на твердость пластически деформированных металлов и сплавов [3, 7, 8, 10] позволили прогнозировать ее положительное воздействие и на прочностные характеристики металлов и сплавов. Тем не менее задача получения экспериментальных данных по влиянию предрекристаллизационной термической обработки на предел прочности и усталостную прочность металлических конструкционных материалов является актуальной.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — исследование влияния предрекристаллизационной термической обработки на показатели прочности стали 18Х2Н4МА после дробеструйной обработки.

Изложение основного материала. Образцы из стали 18Х2Н4МА (ГОСТ 4543) обрабатывали стальной дробью 1,4...1,6 мм на установке Н-0410 в течение 60 мин под давлением 0,2 МПа. Шероховатость поверхности после дробеструйной обработки составила $R_a = 2,5$. Испытание образцов на усталостную прочность проводили в центральной заводской лаборатории НВКГ «Зоря»–«Машпроєкт» на стандартных образцах, с частотой 685 циклов в минуту (11,4 Гц). База испытаний составляла 107 циклов, начальная нагрузка на образец — 140 МПа, шаг повышения нагрузки — 20 МПа. Определение предела прочности проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84 на разрывной машине ИР-5057-50 при нагрузке 5 т, со скоростью нагружения 0,5 мм/мин. Предрекристаллизационную термическую обработку выполняли в электропечи СНОЛ-1.6.2.0.08/9-М1 при температуре 500 °С, с выдержкой при этой температуре в течение 3 мин согласно рекомендациям [3]. Микротвердость определяли с помощью прибора ПМТ-3 (на продольных шлифах) при нагрузке на индентор 20 г согласно ДСТУ ISO 6507-4:2008.

Анализ микроструктуры осуществляли на электронном микроскопе ПЭМ-100М методом реплик [12]. Средний эффективный размер областей когерентного рассеивания (ОКР) определяли методом аппроксимации по двум порядкам отражения в направлении [110] и [211] линейной комбинацией функций Гаусса, что позволило более точно определить размер

It enabled determining the CSR size more accurately with the DRON-3 diffractometer in the $\text{Cu}_{K\alpha}$ radiation not taking into account the impact of the internal stresses and shooting conditions [2].

The surface layer is of paramount importance for the fatigue resistance. Primary cracks appear in the surface layer of an average thickness of 0.05-0.20 mm. The cracks are formed in the surface grains damaged by the effect of the preliminary treatment. They appear at the interface of the surface layer and the base material expanding the strain and being the potential sources of the cracks formation [11]. The fatigue strength limit is increased when the layer with the increased strength characteristics is formed on the surface of the detail.

To determine the state of the surface layer of the 18H2N4MA steel before and after the precrystallization heat treatment, the microhardness distribution over the depth of the sample was determined. The results are presented in Fig. 1.

According to the data presented in Fig. 1, the maximum value of microhardness after shot blasting is seen at a depth of 40 mm and makes up 5.9 GPa (curve 1). The subsequent precrystallization heat treatment at 500 °C with a hold of 3 minutes leads to the hardness characteristics increase up to 8.4 GPa at a depth of 40 microns (curve 2). As a result of shot blasting, the surface layer of the 18H2N4MA steel is deformed to 50%, and there is a phenomenon of work hardening, which is the cause of the hardness characteristics increase. When the metal subjected to the plastic deformation is heated, the reduction processes occur, which is the reduction of the number of defects and their redistribution with the formation of a more equilibrium structure. The stress relief process occurs consisting of two stages: recovery and recryst-

ОКР, не учитывая влияния внутренних напряжений и условий съемки [5], на дифрактометре ДРОН-3 в излучении $\text{Cu}_{K\alpha}$.

Поверхностный слой имеет определяющее значение для сопротивления усталости. Первичные трещины возникают в поверхностном слое толщиной в среднем 0,05...0,20 мм. Трещины образуются в поверхностных зернах, поврежденных действием предварительной обработки. На границе поверхностного слоя и основного материала возникают растягивающие напряжения, являющиеся потенциальными источниками образования трещин [1]. Предел усталостной прочности увеличивается, когда на поверхности детали формируется слой с повышенными показателями твердости.

С целью определения состояния поверхностного слоя стали 18Х2Н4МА до и после предрекристаллизационной термической обработки исследовали распределение микротвердости по глубине образца (результаты представлены на рис. 1).

Согласно представленным на рис. 1 данным максимальное значение микротвердости после дробеструйной обработки наблюдается на глубине 40 мкм и составляет 5,9 ГПа (кривая 1). Последующая предрекристаллизационная термическая обработка при 500 °C с выдержкой в течение 3 мин приводит к повышению показателей твердости до 8,4 ГПа на глубине 40 мкм (кривая 2). В результате дробеструйной обработки происходит деформация поверхностного слоя стали 18Х2Н4МА до 50%, возникает явление наклепа, что и является причиной повышения показателей твердости.

При нагревании пластически деформированного металла происходят восстановительные процессы, которые заключаются в уменьшении количества дефектов и их перераспределении с образованием более равновесной структуры. Происходит процесс снятия внутренних напряжений, который состоит из двух стадий: возврата и рекристаллизации. В свою очередь, при возврате протекают процессы

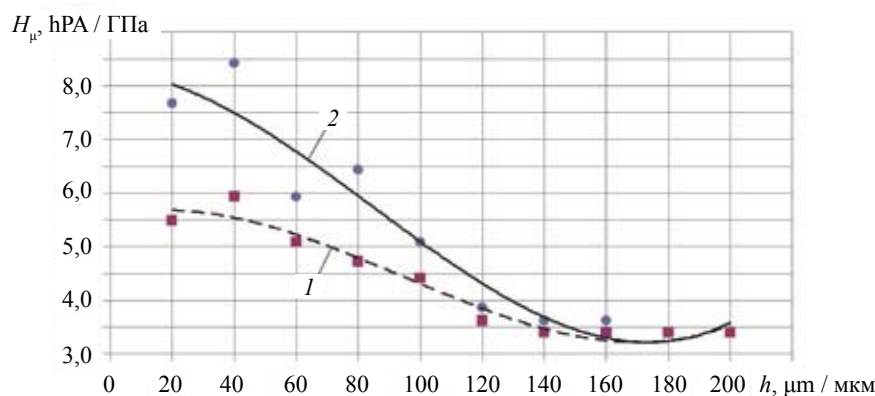


Fig. 1. Microhardness distribution over the depth of the 18H2N4MA steel sample:

Рис. 1. Распределение микротвердости по глубине образца из стали 18Х2Н4МА:

1 — after shot blasting / после дробеструйной обработки; 2 — after shot blasting and the precrystallization heat treatment at 500 °C for 3 min / после дробеструйной и предрекристаллизационной термической обработки (500 °C, 3 мин); h — is the distance from the surface of the sample / расстояние от поверхности образца

tallization. In turn, the polygonization processes occur during the recovery. As a result of the deformation, the dislocation tangles are formed in steels; it is also called a cellular structure. The heating of the material to the temperature when the recrystallization starts leads to the process when the cell boundaries are becoming flat, their body is disposing of even more dislocations, so that they turn into subgrains with low-angle boundaries. In other words, the polygonization process occurs. The subgrains formed during the polygonization tend to grow by migration and subboundaries coalescence under the temperature and hold time increase. The meeting of the migrating subboundaries in the growing subgrains leads to the accumulation of products of the interaction of the low-angle subboundaries and separate dislocations, which probably slows down the movement of dislocations and strengthens the material. Interruption of the heating or hold processes at the polygonization stage and subsequent cooling at a rate eliminating the subgrain growth enables fixing the polygonization subgrains. Therefore, the 18H2N4MA steel hardness increase after the prerecrystallization heat treatment is explained by the refinement of its substructure.

The hardness increase of the steel surface layer as a result of blasting is caused by the formation of internal compressive stresses. To determine the magnitude and nature of the change of internal stresses in the surface layer of the 18H2N4MA steel after the shot blasting and the subsequent prerecrystallization heat treatment by means of measuring of the sample deflection [10], the diagrams of the distribution of internal stresses on the depth of the sample are constructed (Fig. 2).

полигонизации. В сталях в результате деформации образуются дислокационные сплетения — так называемая ячеистая структура. Нагрев такого материала до температуры начала рекристаллизации приводит к тому, что границы ячеек становятся плоскими, тело их еще больше освобождается от дислокаций и они превращаются в субзерна с малоугловыми границами, т. е. осуществляется процесс полигонизации. Субзерна, образующиеся при полигонизации, с повышением температуры и увеличением времени выдержки стремятся увеличиваться путем миграции и коалесценции субграниц. Встреча мигрирующих субграниц и растущих субзерен приводит к накоплению продуктов взаимодействия малоугловых субграниц и отдельных дислокаций, что, вероятно, тормозит движение дислокаций, упрочняя материал. Прерывание процесса нагрева или выдержки на стадии полигонизации и последующее охлаждение со скоростью, исключаяющей рост субзерен, позволяет зафиксировать полигонизационные субзерна. Таким образом, повышение твердости стали 18Х2Н4МА после предрекристаллизационной термической обработки объясняется измельчением субструктуры.

Повышение твердости поверхностного слоя стали в результате дробеструйной обработки вызвано формированием в нем внутренних сжимающих напряжений. Для определения величины и характера изменения внутренних напряжений в поверхностном слое стали 18Х2Н4МА после дробеструйной и последующей предрекристаллизационной термической обработки методом измерения прогиба образца [11] построены эпюры распределения внутренних напряжений по глубине образца (рис. 2).

Дробеструйная обработка стали 18Х2Н4МА в течение 60 мин под давлением 0,2 МПа вызывает формирование в поверхностном слое сжимающих напряжений с максимальным значением 620 МПа, которое

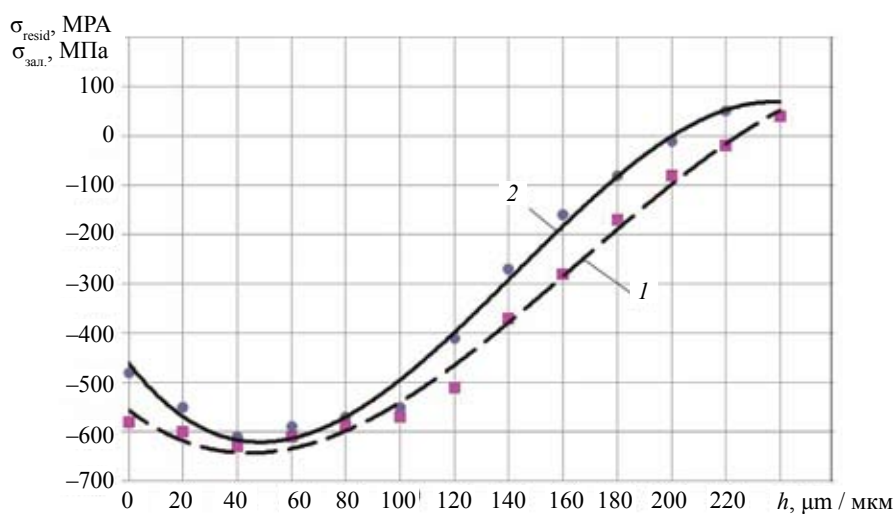


Fig. 2. Distribution of internal residual stresses on the depth of the sample of 18H2N4MA steel:

Рис. 2. Распределение внутренних остаточных напряжений по глубине образца из стали 18Х2Н4МА:

1 — after shot blasting / после дробеструйной обработки; 2 — after shot blasting with the subsequent prerecrystallization heat treatment at 500°C, 3 min / после дробеструйной обработки с последующей предрекристаллизационной термической обработкой (500 °С, 3 мин.); h — is the distance from the surface of the sample / расстояние от поверхности образца

The shot blasting of the 18H2N4MA steel for 60 minutes under the load of 0.2 MPa causes the formation of the compressive stresses in the surface layer, with the maximum value of 620 MPa which is observed at the distance of 40 microns from the surface of the sample (curve 1). The total depth of the cold-hardened layer is 220 microns. The subsequent prerecrystallization heat treatment causes no change in the nature of residual stresses, but only leads to a decrease in absolute values. The maximum value of the compressive residual stresses after the prerecrystallization heat treatment is 610 MPa and is observed at the same distance from the sample surface as after shot blasting, at that the total depth of the cold-hardened layer is reduced to 200 microns. The reduction of the residual stresses value and the depth of the cold-hardened layer as a result of the prerecrystallization heat treatment can be explained by the relaxation processes occurring in the process of polygonization.

The influence of the prerecrystallization heat treatment on the fatigue strength of the 18H2N4MA steel after the subsequent shot blasting was determined by means of testing on the cycle fatigue according to the GOST 25.502-79. The obtained data is given in Table 1.

As is seen from Table 1, the prerecrystallization heat treatment leads to the increase of the fatigue strength of the 18H2N4MA steel about 2.7 times compared with the shot blasting. This is due to the formed substructure of the surface layer as in [3,13]. The structure refinement in the steel surface layer leads to the fact that the fracture which occurs in the material under cyclic loading encounters a greater number of obstacles in the form of small subgrains with the developed surface area and spends more energy to overcome them. As a result of this, the crack passage time increases from the nucleation to the destruction of the sample, at this the fatigue limit increases. The prerecrystallization heat treatment also causes the increase of the tensile strength of the 18H2N4MA steel after shot blasting (Table 2).

наблюдается на расстоянии 40 мкм от поверхности образца (кривая 1). Общая глубина наклепанного слоя составляет 220 мкм. Последующая предрекристаллизационная термическая обработка не вызывает изменения характера остаточных напряжений, а только лишь приводит к уменьшению абсолютных значений. Максимальное значение сжимающих остаточных напряжений после предрекристаллизационной термической обработки составляет 610 МПа и наблюдается на том же расстоянии от поверхности образца, что и после дробеструйной обработки, при этом общая глубина наклепанного слоя понижается до 200 мкм. Уменьшение величины остаточных напряжений и глубины наклепанного слоя в результате предрекристаллизационной термической обработки можно объяснить релаксационными процессами, происходящими в процессе полигонизации.

Влияние предрекристаллизационной термической обработки на усталостную прочность стали 18Х2Н4МА после предварительной дробеструйной обработки определяли методом испытания на циклическую усталость согласно ГОСТ 25.502–79. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, предрекристаллизационная термическая обработка приводит к повышению усталостной прочности стали 18Х2Н4МА примерно в 2,7 раза по сравнению с дробеструйной обработкой. Это объясняется сформированной субструктурой поверхностного слоя, как и в работах [6, 13]. Измельчение структуры в поверхностном слое стали приводит к тому, что трещина, которая возникает в материале при циклических нагрузках, встречает на своем пути большее количество препятствий в виде малых субзерен с развитой поверхностью и тратит больше энергии на их преодоление, в результате чего время прохождения трещины от зарождения до разрушения образца увеличивается, при этом возрастает предел усталостной прочности.

Предрекристаллизационная термическая обработка вызывает повышение предела прочности стали 18Х2Н4МА также после дробеструйной обработки (табл. 2).

Table 1. Value of maximum stresses and number of cycles before the failure of 18H2N4MA steel depending on the treatment type

Таблица 1. Значение максимальных напряжений и количество циклов до разрушения стали 18Х2Н4МА в зависимости от вида обработки

Treatment type Вид обработки	Load Нагрузка σ_{max} , МПа / МПа	Cycle number Количество циклов
Shot blasting for 60 minutes under the load of 0.2 MPa Дробеструйная обработка на протяжении 60 мин под давлением 0,2 МПа	560	3680000 (failure) / (разрушение)
Shot blasting for 60 minutes under the load of 0.2 MPa with the subsequent the prerecrystallization heat treatment at 500°C, with the 3 minute hold Дробеструйная обработка на протяжении 60 мин под давлением 0,2 МПа с последующей предрекристаллизационной термической обработкой при 500 °С, с выдержкой 3 мин	560	3680000 (resisted) / (выдержал)
	580	3680000 (resisted) / (выдержал)
	600	270000 (failure) / (разрушение)

Table 2. Value of tensile strength and plasticity indices of the 18H2N4MA steel depending on the treatment type**Таблица 2.** Значения предела прочности и показателей пластичности стали 18Х2Н4Мn в зависимости от вида обработки

Treatment type / Вид обработки	$\sigma_{\text{в}}, \text{MPa} / \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
Shot blasting for 60 minutes under the load of 0.2 MPa Дробеструйная обработка на протяжении 60 мин под давлением 0,2 МПа	910	6	25
Shot blasting for 60 minutes under the load of 0.2 MPa with the subsequent the precrystallization heat treatment at 500°C, with the 3 minute hold Дробеструйная обработка на протяжении 60 мин под давлением 0,2 МПа с последующей предкристаллизационной термической обработкой при 500 °С, с выдержкой 3 мин	1011	7	25

The increase of the tensile strength at 11% when the plasticity isn't practically changed, after the precrystallization heat treatment of the 18H2N4MA steel in comparison with the shot blasting, can be explained from the point of view of the failure mechanism which occurs during the load of the test sample. The plastic deformation occurs primarily in the grain which most favorably oriented to the external load (i.e., with the greatest tangential stresses). With the increase of the external stress we can observe the gradual involving of the remaining grains during plastic deformation, preserving the integrity of the grain. Under the influence of an external stress of the dislocation motion, generated by the active source, come to the grain limit and hold near it. The stress increases with the accumulation of dislocations. However, it is not enough to move from one subgrain to another through the limit. Therefore, the distribution of slipping from one subgrain to the other one happens at the expense of the fact that after having reached a certain stress at the point of one subgrain, a source of dislocation runs high in the adjacent subgrain. The deformation resistance increases with the decrease of the subgrain size not because of the presence of the limit itself but through the interaction among the grains separated by this limit. Therefore, the increase of the strength limit as a result of the precrystallization heat treatment of steel is associated with substructure refinement (Fig. 3).

In Fig. 3 we can see the partial refinement of subgrains in the structure of the 18H2N4MA steel after the precrystallization heat treatment. After shot blasting the partial refinement is changed from 222÷133 microns to 90÷49 microns. The substructure refinement after the precrystallization heat treatment is proved by the data obtained as a result of the X-ray research (Table 3).

As well as the CSR corresponds to the internal ordered region of the grain and does not include the heavily distorted limits, the size of the CSR is identified with an average crystallite size [3].

The difference in the absolute values of the dimensions of structural elements, obtained with the electron microscope and the X-ray analysis, is due to the fact that

Повышение предела прочности на 11% при практически неизменной пластичности после предкристаллизационной термической обработки стали 18Х2Н4Мn (в сравнении с дробеструйной обработкой) можно объяснить с точки зрения механизма разрушения, который происходил во время нагрузки опытного образца. Пластическая деформация произойдет в первую очередь в зерне, благоприятно ориентированном к внешней нагрузке (т. е. с наибольшим касательным напряжением). С ростом внешнего напряжения наблюдается постепенное вовлечение остальных зерен в процессе пластической деформации при сохранении целостности зерна. Под действием внешнего напряжения смещения дислокаций, генерируемых активным источником, зерна приходят к границе и задерживаются около нее. По мере накопления дислокаций растет напряжение. Однако этого недостаточно, чтобы перейти из одного субзерна в другое через границу. Поэтому распространение скольжения от одного субзерна к другому осуществляется за счет того, что при достижении определенного значения напряжения в точке одного субзерна возбуждается источник дислокации в соседнем субзерне. Сопротивление деформации возрастает с уменьшением размера субзерна не из-за наличия границы самой по себе, а вследствие взаимодействия между зернами, разделенными этой границей. Следовательно, повышение предела прочности в результате предкристаллизационной термической обработки стали связано с измельчением субструктуры (рис. 3).

На рис. 3 видно, что после предкристаллизационной термической обработки в структуре стали 18Х2Н4Мn наблюдается частичное измельчение субзерен, имеющее место после дробеструйной обработки: от 222...133 мкм до 90...49 мкм. Измельчение субструктуры после предкристаллизационной термической обработки подтверждают и данные, полученные в результате рентгеноструктурных исследований (табл. 3).

Поскольку ОКР соответствует внутренней упорядоченной области зерна и не включает в себя сильно искаженные границы, размер ее отождествляют со средним размером кристаллитов [6].

Разница в абсолютных значениях размеров структурных элементов, полученных на электронном микроскопе и при рентгеноструктурном анализе, связана с тем, что рентгеноструктурный анализ

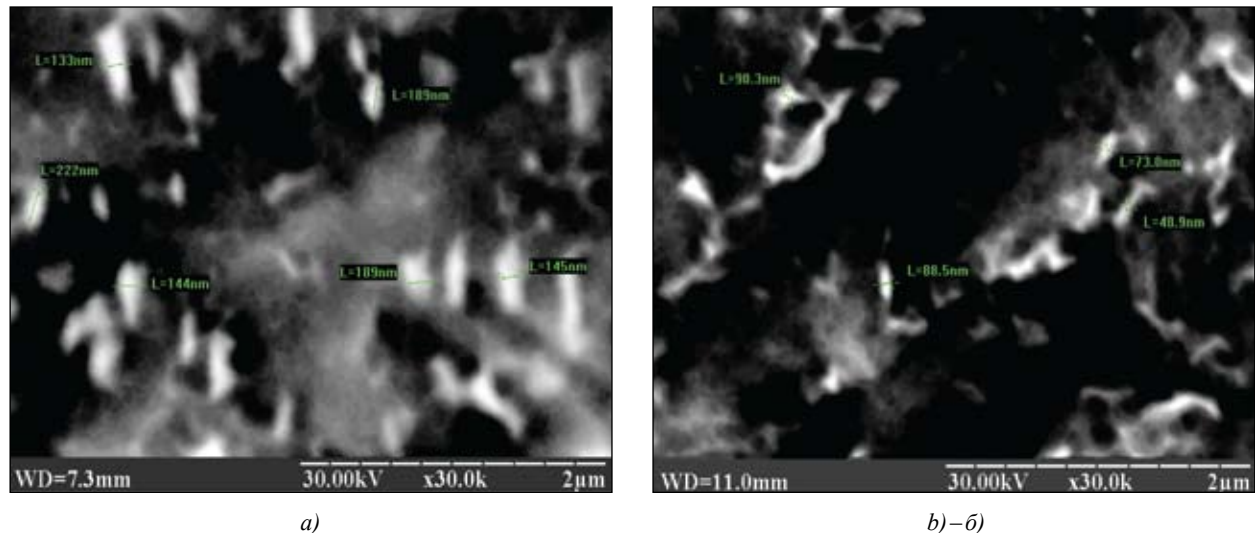


Fig. 3. Microstructure of the 18H2N4MA steel:

Рис. 3. Микроструктура стали 18Х2Н4МА:

a) — after shot blasting / после дробеструйной обработки; б) — after shot blasting with subsequent the precrystallization heat treatment at 500°C, 3 min / после дробеструйной обработки с последующей предкристаллизационной термической обработкой (500 °С, 3 мин)

Table 3. CSR value of the 18H2N4MA steel depending on the treatment type

Таблица 3. Размер ОКР для стали 18Х2Н4МА в зависимости от вида обработки

Treatment type Вид обработки	Intrinsic broadening, grad. Физическое уширение, град		CSR size D, nm Размер ОКР D, нм
	[110]	[211]	
Shot blasting for 60 minutes under the load of 0.2 MPa Дробеструйная обработка на протяжении 60 мин под давлением 0,2 МПа	0,4	0,6	265
Shot blasting for 60 minutes under the load of 0.2 MPa with the subsequent the precrystallization heat treatment at 500°C, with the 3 minute hold Дробеструйная обработка на протяжении 60 мин под давлением 0,2 МПа с последующей предкристаллизационной термической обработкой при 500 °С, с выдержкой 3 мин	0,475	0,8	142

the X-ray analysis shows the average size of the structural elements of the entire volume of the sample when the depth is up to 400 microns. The size of the structural elements of not only of the treated surface layer, but also the parent metal is taken into account partially. However, despite the difference in the absolute values of the dimensions of structural elements, obtained by various metadata of the structural analysis, the given results indicate that the precrystallization heat treatment leads to the refinement of the substructure of the 18H2N4MA steel after the preliminary shot blasting.

Thus, the prospects for the further development of the research are in the detailed study of the processes of formation of fine grain substructure as a result of the precrystallization heat treatment.

CONCLUSIONS. The precrystallization heat treatment at 500 °C for 3 minutes after shot blasting

показывает средний размер структурных элементов по всему объему образца на глубине до 400 мкм, частично учитывая размер структурных элементов не только обрабатываемого поверхностного слоя, но и основного металла. Однако несмотря на разницу абсолютных значений размеров структурных элементов, полученных различными методами структурного анализа, представленные результаты свидетельствуют, что предкристаллизационная термическая обработки приводит к измельчению субструктуры стали 18Х2Н4МА после предварительной дробеструйной обработки.

Таким образом, перспективы дальнейшего развития исследований заключаются в детальном изучении процессов формирования мелкозернистой субструктуры в результате предкристаллизационной термической обработки.

ВЫВОДЫ. Предкристаллизационная термическая обработка при 500 °С в течение 3 мин после

leads to the increase of the fatigue strength of 18H2N4MA steel at 2.7 times, the increase of the strength limit at 11 % and the hardness increase of the surface layer at 42% by means of the formation of the areas with fine grain substructure.

дробеструйной обработки приводит к повышению усталостной прочности стали 18Х2Н4Мn в 2,7 раза, предела прочности на 11 % и увеличению твердости поверхностного слоя на 42% за счет формирования участков с измельченной субструктурой.

Список литературы

- [1] Влияние различных методов поверхностного упрочнения на усталостную прочность [Текст] / И.В. Пономаренко, С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, И.И. Кондратенко // Вестник ХНАДУ. — 2006.
- [2] Вплив поверхневого зміцнення на механічні властивості виробів [Текст] / І.В. Дощечкіна, С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко, С.І. Аксьонова, В.К. Лобанов // Автомобільний транспорт : зб. наук. праць — 2005. — № 16. — С. 79–82.
- [3] Вплив деформації та легуючих елементів на твердість сталей і напилених покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки [Текст] / О.М. Дубовий, С.Г. Кулік, О.О. Жданов, М.М. Бобров, О.І. Мирко // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2011. — № 2. — С. 36–44.
- [4] Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов [Текст] : 3-е изд. / С.С. Горелик, С.В. Добаткина, Л.М. Капуткина. — М. : МИСИС, 2005. — 432 с.
- [5] Горелик, С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ [Текст] / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. — М. : Металлургия, 1970. — 336 с.
- [6] Гусев, А.И. Аттестация нанокристаллических материалов по размеру частиц (зерен) [Текст] / А.И. Гусев, А.С. Курлов // Металлофизика и новейшие технологии. — 2008. — Т. 30, № 5. — С. 679–694.
- [7] Дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей деформованих металів і сплавів термічною обробкою [Текст] / О.М. Дубовий, Н.Ю. Лебедева, Т.А. Янковець, А.А. Карпеченко, О.О. Жданов // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — № 3 (432). — С. 69–79.
- [8] Дубовий, О.М. Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості напилених покриттів та деформованих металів і сплавів [Текст] / О.М. Дубовий, Н.Ю. Лебедева, Т.А. Янковець // Металознавство та обробка металів. — 2010. — № 3. — С. 7–10.
- [9] Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностной пластической деформацией [Текст] / Д.Д. Папшев. — М. : Машиностроение, 1978. — 152 с.
- [10] Пат. а 2010 02248 Україна, МІЖ С2П 8/00 С22F 1/00. Спосіб деформаційно-термічної обробки металів та сплавів [Текст] / О.М. Дубовий, Т.А. Янковець, Н.Ю. Лебедева, Ю.О. Казимиренко, О.О. Жданов, М.М. Бобров; заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування. — № 95378 ; заявл. 01.03.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.
- [11] Поляк, М.С. Технология зміцнення. Технологічні методи зміцнення [Текст] / М.С. Поляк. — М. : Машиностроение, 1995. — 688 с.
- [12] Синдо, Д. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия [Текст] : монография / Д. Синдо, Т. Оикава ; пер. с англ. С.А. Иванова. — М. : Техносфера, 2006. — 246 с.
- [13] Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность субмикро- и нанокристаллических металлов и сплавов (обзор) [Текст] / В.Ф. Терентьев, А.А. Байкова // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2010. — № 1. — С. 8–24.

© А.Н. Дубовой, Г.В. Волков, А.А. Жданов

Статью рекомендует в печать
д-р техн. наук, проф. В.Ф. Квасницкий

КНИЖНАЯ ПОЛКА



Исследование проблемы сварочных напряжений и деформаций пережило пик в 30-х годах XX века. Исследования в основном были направлены на раскрытие механизма образования деформаций и напряжений при сварке низкоуглеродистых сталей.

В последующие годы круг научных учреждений и специалистов, которые занимались проблемами прочности сварных конструкций, сварочных напряжений и деформаций, непрерывно расширялся. Развитие шло по пути исследования сварочных напряжений в различных типах соединений, влияния напряжений на прочность, устойчивость против хрупкого разрушения. Сегодня широкое применение получили методы теории упругости и пластичности, компьютерные технологии, различные программные комплексы для исследования сварочных напряжений и деформаций и решения конкретных проблем.

