

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРУТКА НА МЕЛКОСОРТНО-ПРОВОЛОЧНОМ СТАНЕ И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

И. А. ПАНКОВЕЦ¹, инженер-технолог 1-й категории технического управления прокатного отдела, ivanpankovec@gmail.com; В. И. ВОЗНАЯ¹, ведущий инженер испытательной лаборатории сортопрокатного цеха № 2 центральной заводской лаборатории; А. В. ВЕДЕНЕЕВ², канд. техн. наук; М. Н. ВЕРЕЩАГИН², д-р техн. наук, профессор кафедры “Металлургия и технологии обработки материалов” (¹ ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “БМК”, Республика Беларусь, Гомельская обл., г. Жлобин; ² Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Республика Беларусь, г. Гомель)

Аннотация. Важным потребительским свойством сортового проката является качество его поверхности. В процессе разработки мероприятий, направленных на повышение качества поверхности сортового проката в прутках, производимого на стане 370/150 ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “БМК”, металлографической экспертизой установлено, что дефекты, выявляемые при отделке прутка, не связаны с качеством непрерывнолитой заготовки (НЛЗ), а образованы в процессе деформации. Проведено исследование механизма образования дефектов поверхности на горячекатаном прутке прокатного происхождения — “деформационная рванина” и “морщины”. Приведены результаты численного моделирования сортовой прокатки в черновой группе клетей при различных температурно-деформационных параметрах. Выявлены закономерности образования поверхностных дефектов на прутке в готовом сорте. Показано, что причиной поверхностных дефектов прокатного происхождения “деформационная рванина” и “морщины” является высокий температурный градиент между сердцевинной и поверхностью заготовки, обусловленный местным переохлаждением поверхности в зоне углов НЛЗ, который приводит к неравномерности вытяжки различных слоев деформируемой заготовки. Для устранения этих дефектов необходимо обеспечить минимально возможный температурный градиент между поверхностью и сердцевинной НЛЗ путем контролируемого охлаждения валков. Расчетным путем установлена максимально допустимая температура рабочей поверхности валков черновой группы клетей, эмпирическим путем определены фактические температуры валков при действующей технологии производства, а также температура мест установки опорных подшипников валков. Показана техническая и технологическая возможность совершенствования технологии прокатки на мелкосортном стане с целью повышения качества поверхности сортового проката в прутках. Осуществлена корректировка действующей технологии и установлены новые технологические режимы прокатки с контролируемым охлаждением валков, позволившие значительно снизить отбраковку готового продукта по дефектам прокатного производства. Предложено приспособление для черновой группы клетей, позволяющее минимизировать попадание охлаждающей жидкости на раскат.

Ключевые слова: мелкосортно-проволочный стан, сортовая прокатка, качество поверхности проката в прутках, поверхностные дефекты прокатного происхождения, совершенствование технологии прокатки, контролируемое охлаждение валков.

Ссылка для цитирования: Панковец И.А., Возная В.И., Веденеев А.В., Верещагин М.Н. Исследование условий образования поверхностных дефектов при прокатке прутка на мелкосортно-проволочном стане и методы их устранения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 10. С. 1053-1059.

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-10-1053-1059

A STUDY OF CONDITIONS OF SURFACE DEFECTS FORMATION WHEN BAR ROLLING AT A BAR AND WIRE MILL AND METHODS OF THEIR ELIMINATION

I. A. PANKOVETS¹, process engineer of the 1st category, technical administration of rolling dpt., ivanpankovec@gmail.com; V. I. VOZNAYA¹, leading engineer, testing lab. of long products shop No. 2, central plant lab.; A. V. VEDENEEV², PhD (Tech.); M. N. VERESHCHAGIN², HD (Tech.), Prof., Dpt. “Metallurgy and technology of materials processing” (¹ OJSC “BMZ – managing company of holding “BMK”, Republic of Belarus, GOMEL rgn., Zhlobin; ² Gomel State Technical University after P.O. Sukhoy, Republic of Belarus, Gomel)

Abstract. Quality of long products surface is an important consumer property of it. In the process of measures elaboration aimed at the increase of long products surface quality, in particular of bars produced at the mill 370/150 of OJSC “BMZ – managing company of holding “BMK”, studies were accomplished by metallographic laboratory. It was established that defects being revealed at

the bars finishing, don't relate to the quality of continuously casted billet (CCB), but formed in the process of deformation. Studies of the mechanism of surface defects formation on hot-rolled bar of rolling origin – deformation fissure and wrinkles were carried out. Results of numerical simulation of rolling in roughing group of stands at various temperature-deformation parameters presented. Regularities of formation of surface defects on the bar in the finished product were revealed. It was shown that the reason of the surface defects of rolling origin – deformation fissure and wrinkles was a high temperature gradient between the core and the surface of billet, originated from local overheating of surface in the angles zone of CCB resulted in nonuniformity of drawing out of different layers of the billet being deformed. To eliminate the defects, minimum possible temperature gradient between the surface and the core of a billet by controlled rolls cooling should be provided. By calculation, the maximum permissible temperature of the working surface of the rolls of the rough group of stands was established, and empirically the actual temperatures of the rolls with the current production technology, as well as the temperature of the rolls support bearings seats of the rolls were measured. The technical and technological possibilities for improving of rolling technology on a bar and wire mill in order to improve the surface quality of rolled bars were demonstrated. The existing technology was adjusted and new technological modes of rolling with controlled cooling of the rolls were established, which made it possible to significantly reduce the rejection of the finished product due to defects in rolling production. A device was proposed for the roughing group of stands, which enables to minimize the ingress of coolant onto the bar rolled.

Key words: bar and wire mill, long products rolling, bars surface quality, surface defects of rolling origin, improving of rolling technology, controlled rolls cooling.

For citation: Pankovets I.A., Voznaya V.I., Vedenev A.V., Vereshchagin M.N. A study of conditions of surface defects formation when bar rolling at a bar and wire mill and methods of their elimination. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2021, vol. 77, no. 10, pp. 1053-1059. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-10-1053-1059

Требования машиностроительной и других областей промышленности, являющихся потребителями горячекатаного продукта в качестве сырья для своего производства, в отношении качества постоянно растут. Одной из важных характеристик качества сортового проката, наряду с комплексом физико-механических свойств, является качество поверхности. Минимизация поверхностных дефектов — это исключение дополнительной обработки поверхности в виде зачистки и обточки, ведущих в лучшем случае к увеличению потерь материала, в худшем — к выходу продукта за регламентируемые допуски типоразмера.

С целью получения улучшенного качества поверхности сортового проката в прутках в соответствии с заявленными высокими требованиями потребителей на прокатном стане 370/150 в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» внедрен ряд мероприятий.

Для разработки мероприятий, направленных на улучшение качества поверхности, необходима правильная классификация дефектов и определение условий их образования [1]. Проведенная металлографическая экспертиза позволила установить, что дефекты, выявляемые цеховыми установками при отделке прутка, не наследованы с непрерывнолитой заготовки (НЛЗ), а образовались в процессе деформации.

Большинство исследованных поверхностных дефектов представляли собой раскрытые разрывы, расположенные поперек либо под углом к направлению наибольшей вытяжки металла при прокатке, — «деформационную рванину» (рис. 1), и группы чередующихся продольных углублений и выступов — «морщины» (рис. 2) [2]. Поверхностные дефекты были расположены как по всей длине прутков, так и имели периодический характер. Глубина варьировалась от 0,1 до 2,5 мм.

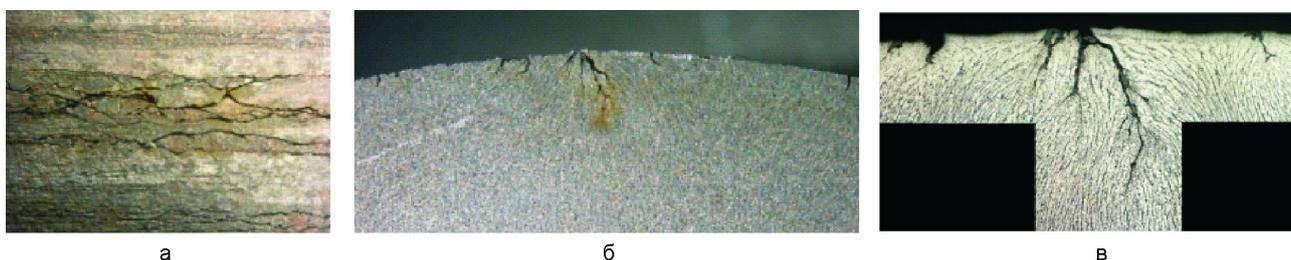


Рис. 1. Дефект «деформационная рванина» на горячекатаном прутке:
а — поверхность; б — макроструктура; в — микроструктура после травления в 4 %-ном растворе азотной кислоты в спирте

Fig. 1. Defect «deformation fissure» on a hot-rolled bar:
а — surface; б — macrostructure; в — microstructure after etching in a 4% solution of nitric acid in alcohol

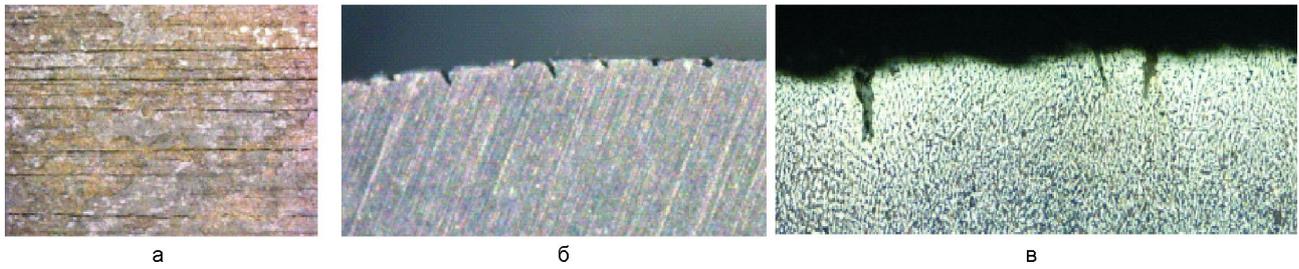


Рис. 2. Дефект “морщины” на горячекатаном прутке:
a — поверхность; б — макроструктура; в — микроструктура после травления в 4 %-ном растворе азотной кислоты в спирте

Fig. 2. Defect “wrinkles” on a hot-rolled bar:
a — surface; б — macrostructure; в — microstructure after etching in a 4% solution of nitric acid in alcohol

Кроме того, металлографическая экспертиза позволила установить, что в большинстве случаев расположение дефектов соответствовало углам НЛЗ (рис. 3).

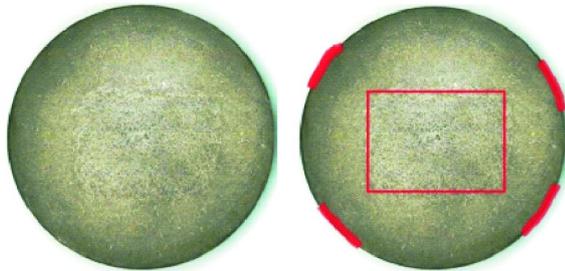


Рис. 3. Расположение поверхностных дефектов на макротемплете металлопроката

Fig. 3. Location of surface defects on the macro-sample of rolled product

Одной из вероятных причин образования исследованных дефектов является пониженная

пластичность металла при повышенных обжатиях боковых граней.

Для подтверждения этого проведено математическое моделирование процесса деформации слитка в прокатных валках. При построении численной модели прокатки в черновой группе клетей для получения круга диам. 80 мм из НЛЗ сечением 250×300 мм был применен метод конечных элементов [3].

Переменными для построения модели были температура поверхности НЛЗ на входе в первую клеть (температура начала прокатки) и температура рабочей поверхности прокатных валков (табл. 1). Температуры поверхности НЛЗ выбраны как граничные температуры, установленные нормативной документацией, используемой в производстве. Минимальная температура рабочей поверхности валков принята равной температуре охлаждающей жидкости, максимальная — как произвольное значение для вычисления функции температурного градиента.

ТАБЛИЦА 1. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

TABLE 1. INPUT DATA FOR SIMULATION OF ROLLING PROCESS

Входные данные	Численные значения переменных для различных вариантов прокатки			
	вариант 1	вариант 2	вариант 3	вариант 4
Температура НЛЗ на входе в первую клеть $T_{нач}$, °C	1100	1100	1000	1000
Температура поверхности прокатных валков $T_{в}$, °C	20	150	20	150

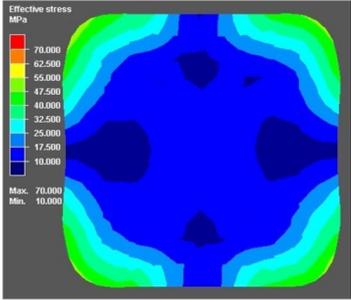
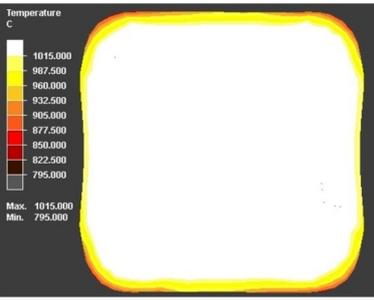
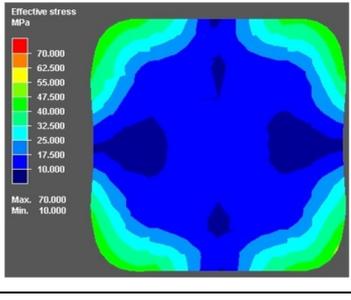
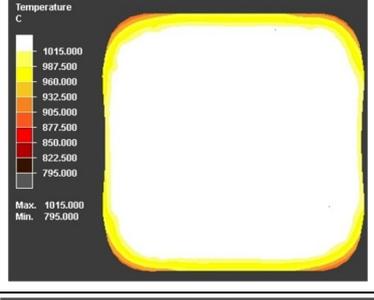
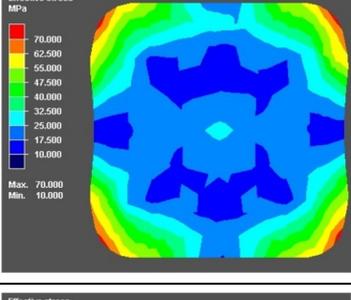
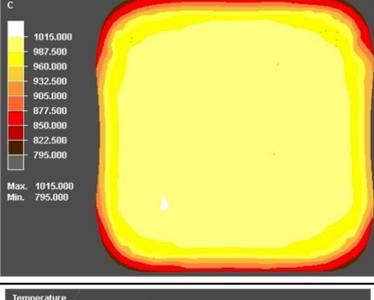
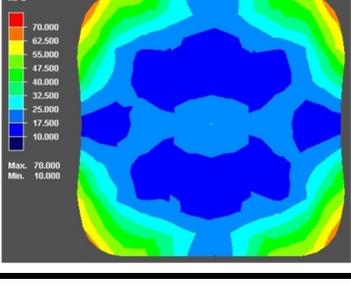
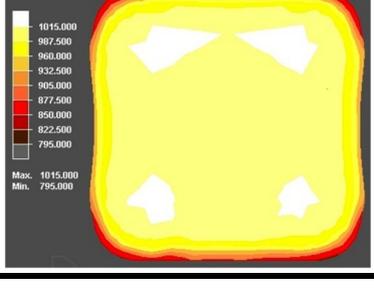
По результатам построения моделей температурно-деформационных параметров прокатки установлено, что максимальные напряжения деформации σ_{max} сконцентрированы в углах НЛЗ. При этом в углах наблюдается максимальное переохлаждение, выраженное разницей темпе-

ратур (ΔT) между сердцевиной заготовки ($T_{сердц}$) и поверхностью углов ($T_{угл}$).

Полученные модели и численные результаты моделирования, выраженные распределением напряжений деформации и температур по сечению заготовки, представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

TABLE 2. RESULTS OF SIMULATION OF ROLLING PROCESS

Модель	Визуализация температурно-деформационных параметров прокатки	
	распределение напряжений в сечении раската	распределение температуры в сечении раската
Вариант 1 Входные данные: $T_{\text{нач}} = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{в}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Выходные данные: $\sigma_{\text{max}} = 47,5 \text{ МПа}$; $T_{\text{угл}} = 877 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{сердц}} = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta T = 223 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
Вариант 2 Входные данные: $T_{\text{нач}} = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{в}} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Выходные данные: $\sigma_{\text{max}} = 40 \text{ МПа}$; $T_{\text{угл}} = 905 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{сердц}} = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta T = 195 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
Вариант 3 Входные данные: $T_{\text{нач}} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{в}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Выходные данные: $\sigma_{\text{max}} = 70 \text{ МПа}$; $T_{\text{угл}} = 822 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{сердц}} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta T = 178 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
Вариант 4 Входные данные: $T_{\text{нач}} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{в}} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Выходные данные: $\sigma_{\text{max}} = 62,5 \text{ МПа}$; $T_{\text{угл}} = 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{сердц}} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta T = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$		

Из табл. 2 видно, что при температуре начала прокатки $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре поверхности валков $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ напряжения деформации в углах заготовки составляют $47,5 \text{ МПа}$, градиент температур между поверхностью и сердцевиной заготовки достигает $223 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При повышении температуры поверхности валков до $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ напряжения деформации снижаются до 40 МПа одновременно с уменьшением градиента температур до $195 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

При температуре начала прокатки $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре поверхности валков $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ напряжения деформации в углах заготовки возрастают до 70 МПа , при этом градиент температур между

поверхностью и сердцевиной заготовки составляет $178 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При повышении температуры поверхности валков до $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ напряжения деформации снижаются до $62,5 \text{ МПа}$, градиент температур при этом наименьший и составляет $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Стоит отметить, что при температуре начала прокатки $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается минимальный температурный градиент, что является благоприятным условием для равномерной деформации. Однако возросшее напряжение на углах в очаге деформации в совокупности с температурой, близкой к температуре рекристаллизации, является негативным фактором для пластичности.

Анализируя полученные данные, можно сделать предварительный вывод: чем выше температура поверхности НЛЗ и валка, тем ниже риски, связанные с появлением дефектов поверхности.

Мониторинг температуры поверхности НЛЗ перед прокаткой на современных прокатных станах производится непрерывно с регистрацией в системе слежения за прокатом. Контроль и управление процессом нагрева с последующим прокатом в узком температурном диапазоне 1085 ± 15 °С является выполнимым. При этом температура поверхности валков в существующей технологии не контролируется и не регламентируется.

Для реализации планов по управлению и контролю температуры поверхности валков при горячей прокатке заготовок в черновой группе клетей необходимо понимать, что наиболее существенными являются потери тепла деформируемого металла от избыточного водоохлаждения валков и теплопередачи к валкам в очаге деформации. Так как величина теплового потока в очаге деформации, а следовательно, и степень охлаждения зависят от разности температур металла и валков, то, изменяя интенсивность охлаждения валков (расход воды), можно влиять на охлаждение поверхности проката [4].

Кроме того, при снижении расхода воды, подаваемой на поверхность валка, уменьшается и количество воды, попадающей на поверхность прокатываемой заготовки. Это уменьшает потери тепла и, следовательно, повышает температуру поверхностных и подповерхностных слоев металла.

Установлено, что чем больше перепад температур между поверхностью валка и металла, тем больше теплоотдача от металла к валку [5]. Стремление достичь наименьшего перепада температур ограничивается предельными значениями температур, обусловленными условиями охлаждения и работоспособности валков.

Наименьшая температура поверхности валка, которую можно достичь во время прокатки при охлаждении их водой 20–40 °С. Максимальная температура поверхности валков обуславливается фазовыми превращениями в материале валка при разогреве их в очаге деформации и, как следствие, их износостойкостью и качеством прокатываемого металла.

На границе контакта металла с валком температура поверхности и подповерхностных слоев ($t_{\text{кп}}$) устанавливается, как принято считать, равной полусумме температур металла и валка [6]:

$$t_{\text{кп}} = \frac{(t_{\text{м}} + t_{\text{в}})}{2},$$

где $t_{\text{м}}$ — температура поверхности НЛЗ перед входом в очаг деформации; $t_{\text{в}}$ — температура рабочей поверхности валка перед входом в очаг деформации.

Так как температура фазовых превращений для материала валков черновой группы составляет 723 °С, то температура поверхности валка в очаге деформации должна быть ниже этой величины.

Для принятой максимальной температуры металла перед очагом деформации 1100 °С максимальное значение температуры поверхности валков перед входом в очаг деформации составит 346 °С.

Результаты математического моделирования и теоретических расчетов максимально допустимых температур валков при прокатке позволили провести корректировку действующей технологии в направлении повышения температуры поверхности валков. Контролируемое охлаждение валков было реализовано изменением объема подаваемой воды.

Для оценки необходимого количества воды, подаваемой на прокатные валки черновой группы, предварительно были проведены измерения температуры поверхностей валков и подушек подшипников валков бесконтактным способом с помощью промышленного тепловизора.

При температуре начала прокатки 1100 °С максимальная температура поверхности валка перед очагом деформации составляла 100,4 °С, максимальная температура элемента клетки с подшипником валка достигала 34,5 °С. Температура подшипника была принята равной 34,5 °С, что показало наличие температурного запаса в отношении заявленных производителем эксплуатационных требований, составляющих 70 °С. Измерения температур проводились при давлении в системе орошения валков черновой группы 5 бар. Минимально возможное давление системы составляет 1,5 бар.

В ходе опытной прокатки, постепенно снижая давление в системе орошения и контролируя процесс повышения температуры валков, был снижен уровень расхода воды и установлено давление 3 бар. При этом максимальная температура валков составила 190 °С, температура подушки подшипника достигла 47 °С.

Эффективность опытного технологического режима прокатки с контролируемым охлаждением валков была оценена сопоставлением уровня несоответствующей продукции до и после внедрения мероприятия. В условный период до внедрения мероприятий при производстве сортового проката в прутках диаметром от 20 до 80 мм объемом 4740,105 т количество несоответствующей продукции по поверхностным дефектам прокатного производства составило 9,620 т (2029 ppm). За аналогичный период вре-

мени после внедрения мероприятий при сопоставимом объеме производства 4485,108 т количество несоответствующей продукции снизилось до 0,251 т (56 ppm).

Дальнейшее снижение уровня расхода воды до установления давления 2 бар позволило полностью устранить причину поверхностных дефектов, классифицируемых как “деформационная рванина” и “морщины”. Температура валков при внедренном технологическом режиме прокатки с контролируемым охлаждением валков составила 225 °С, температура подшипников достигла 52 °С. Стоит упомянуть и о возможном негативном последствии снижения уровня охлаждающей жидкости — уменьшении стойкости валков, ведущем, в свою очередь, к увеличению частоты смены прокатного инструмента. Однако за указанный период работы опытного технологического режима снижение стойкости прокатных валков не отмечено.

Как было описано выше, важным фактором в образовании градиента температур является не только температуры начала проката и рабочей поверхности валков, но и количество воды, попадающей на верхнюю грань бляма. Спецификой проката в черновой группе клетей является образование вогнутой формы поперечного профиля раската в первых трех клетях, состоящих из ящичных калибров, а также образование частично разрушенной оксидной пленки на поверхности раската в разъеме валков — “разгарной рубашки”. Такая поверхность имеет высокую степень шероховатости, состоит из оксидов железа, относится к технологически неизбежным

факторам при производстве и не является дефектом поверхности.

Охлаждающая жидкость, попадая в вогнутость на раскате и удерживаемая “разгарной рубашкой”, точно охлаждает раскат. Для минимизации рисков возникновения мелких трещин, связанных с температурным градиентом, одним из наиболее эффективных мероприятий является установка приспособления подачи воды, повторяющего контур калибра и выводящего воду за пределы раската. В труднодоступных местах для устранения попадания воды на углы прокатываемого слитка устанавливаются сопла обдува валков сжатым воздухом. Концепция водоотводящего приспособления представлена на рис. 4.

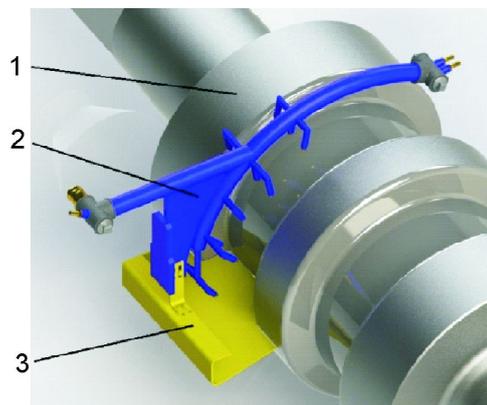


Рис. 4. Водоотводящее приспособление: 1 — прокатный валок; 2 — секция охлаждения; 3 — лоток

Fig. 4. Drainage facility: 1 — rolling roll; 2 — cooling section; 3 — tray

Выводы

1. К образованию поверхностных дефектов прокатного происхождения “деформационная рванина” и “морщины” приводит неравномерность вытяжки различных слоев деформируемой заготовки, причиной которой является высокий температурный градиент между сердцевинной и поверхностью заготовки, обусловленный местным переохлаждением поверхности в зоне углов НЛЗ.

2. Для улучшения качества поверхности необходимо обеспечить минимально возможный

температурный градиент между поверхностью и сердцевинной НЛЗ, что реализуется внедрением прокатки с контролируемым охлаждением валков, не допуская при этом перегрева поверхности валка и подушек подшипников.

3. Максимальная эффективность может быть достигнута при исключении локального переохлаждения раската путем устранения попадания воды, охлаждающей валки, на верхнюю грань НЛЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дефекты стали: справочник / Под ред. С.Н. Новокщеновой. — М.: Металлургия, 1984. — 199 с.
2. ГОСТ 21014–88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 60 с.
3. Каменев С.В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие. — Оренбург: ОГУ, 2019. — 110 с.
4. Воронцов Н.М., Жадан В.Т., Шнееров Б.Я. и др. Эксплуатация валков обжимных и сортовых станков. — М.: Металлургия, 1973. — 288 с.

5. Яловой Н.И., Тылкин М.А., Полухин П.И., Васильев Д.И. Тепловые процессы при обработке металлов давлением. — М.: Высшая школа, 1973. — 631 с.
6. Пат. SU 1369839 А1, МПК В 21 В 27/06. Способ охлаждения валков и проката при прокатке слябов / А.С. Надрега, А.Г. Дылюк, О.Н. Сосковец и др. // Заявл. 26.12.1985; опубл. 30.01.1988.

Поступила 12 августа 2021 г.

REFERENCES

1. *Defekty stali* [Defects of Steel]. Novokshchenova S.N. ed. Moscow: Metallurgiya, 1984, 199 p. (In Russ.).
2. *GOST 21014–88. Prokat chernykh metallov. Terminy i opredeleniya defektov poverkhnosti* [State Standard 21014–88. Rolled ferrous metals. Terms and definitions of surface defects]. Moscow: Izd-vo standartov, 1988, 60 p. (In Russ.).
3. Kamenev S.V. *Osnovy metoda konechnykh elementov v inzhenernykh prilozheniyakh* [Fundamentals of the finite element method in engineering applications]. Orenburg: OGU, 2019, 110 p. (In Russ.).
4. Vorontsov N.M., Zhadan V.T., Shneerov B.Ya., Pavlovskii V.Ya., Kulak Yu.E., Gunin I.V. *Ekspluatatsiya valkov obzhimnykh i sortovykh stanov* [Operation of rolls for crimping and section mills]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 288 p. (In Russ.).
5. Yalovoi N.I., Tylkin M.A., Polukhin P.I., Vasil'ev D.I. *Teplovye protsessy pri obrabotke metallov davleniem* [Thermal processes in the processing of metals by pressure]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973, 631 p. (In Russ.).
6. Nadrega A.S., Dilyuk A.G., Soskovets O.N., Ratnichenko I.S., Onushkevich G.F., Chmelev A.A. *Sposob okhlazhdeniya valkov i prokata pri prokatke slyabov* [Method of cooling rolls and rolled products when rolling slabs]. Patent SU no. 1369839 А1. IPC B21B 27/06. 1988. (In Russ.).

Received August 12, 2021

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАКАЛЕННО-ОТПУЩЕННОЙ ПРУЖИННОЙ ПРОВОЛОКИ

*В. А. ХАРИТОНОВ, канд. техн. наук, профессор; Н. Ю. СМЕТНЁВА, аспирант
(ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова», Россия, г. Магнитогорск)*

Аннотация. Закаленно-отпущенная пружинная проволока пользуется большим спросом в отечественной автомобильной промышленности. Значительная часть такой проволоки импортируется. В связи с увеличением потребности в термообработанной проволоке для пружин ответственного назначения и реализацией мер по импортозамещению актуальными являются проблемы совершенствования технологических процессов ее производства. Приведены основные технические требования к пружинной проволоке в отечественных и зарубежных стандартах, рассмотрены факторы, оказывающие влияние на качество готовой продукции. Приведено описание технологических процессов производства закаленно-отпущенной пружинной проволоки ответственного назначения. Показано, что отечественная технологическая схема производства термообработанной пружинной проволоки аналогична зарубежной, однако для достижения качества продукции, соответствующей нормам EN 10270-2:2012, требуется ее усовершенствование. Разработаны предложения по совершенствованию технологии изготовления отечественной конкурентоспособной продукции. Среди них отмечена необходимость использования сталей системы Si–Cr или Si–Cr–V, дополнительно легированных марганцем, кобальтом, вольфрамом и (или) другими элементами. Предложено ввести операцию скальпирования вместо обточки и систему неразрушающего контроля, использовать ресурсосберегающие маршруты волочения проволоки с высокой равномерностью свойств, заменить закалку и отпуск термомеханической обработкой (для некоторых видов проволоки), использовать современное высокопроизводительное оборудование.

Ключевые слова: пружинная проволока, химический состав рессорно-пружинной стали, термомеханическая обработка, ресурсосберегающие маршруты волочения проволоки, термическая обработка.

Ссылка для цитирования: Харитонов В.А., Сметнёва Н.Ю. Современное состояние и направления совершенствования технологических процессов изготовления закаленно-отпущенной пружинной проволоки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 10. С. 1060-1065.

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-10-1060-1065

MODERN STATE AND DIRECTIONS OF PERFECTION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MANUFACTURING HARDENED-TEMPERED SPRING WIRE

*V. A. KHARITONOV, PhD (Tech.), Prof.; N. YU. SMETNEVA, Postgraduate
(FGBOU VO "Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov", Russia, Magnitogorsk)*

Abstract. Hardened-tempered spring wire has a great demand in domestic automobile industry. A considerable part of such a wire is imported. In view of increase of demand in treated wire for springs of critical application and measures implementation for import substitution, perfection of technological processes of its production becomes actual. Basic technical requirements to spring wire as per domestic and foreign standards presented, the factors effecting the quality of finished products considered. Description of technological processes of hardened-tempered spring wire of critical application presented. It was shown that domestic technological scheme of treated wire production is analogous to foreign one, however to reach the quality of products, correspondent to norms EN 10270-2:2012, a perfection of it is needed. Proposals to improve the technology of manufacturing domestic competitive products elaborated. Among them a necessity to use steels of Si–Cr or Si–Cr–V system, additionally alloyed by manganese, cobalt, tungsten a(or) other elements highlighted. It was proposed to implement an operation of scalping instead of turning and a system of nondestructive control, to use resource-saving routes of wire drawing with high uniformity of properties, to replace hardening and tempering by thermomechanical treatment (for some kinds of wire), to use modern highly-productive equipment.

Key words: spring wire, chemical composition of laminated spring steel, thermomechanical treatment, resource-saving routes of wire drawing, heat treatment.

Fir citation: Kharitonov V.A., Smetneva N.Yu. Modern state and directions of perfection of technological processes of manufacturing hardened-tempered spring wire. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2021, vol. 77, no. 10, pp. 1060-1065. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-10-1060-1065

С каждым годом на отечественном и мировом рынках металлопродукции происходит повышение потребительских требований к изделиям, что обуславливает необходимость применения новых материалов и технологий их производства. В настоящее время в связи с увеличением потребности и в рамках политики импортозамещения интерес представляет производство закаленно-отпущенной проволоки из углеродистых и легированных сталей, которая пользуется большим спросом преимущественно в автомобилестроении и применяется для навивки пружин ответственного назначения, например, клапанных пружин, пружин сцепле-

ния и др. По данным работы [1], потребность отечественных производителей пружин в закаленно-отпущенной проволоке диаметром до 5 мм по EN 10270-2:2012 для клапанных пружин составляет 100 т/мес., в проволоке диам. 7–16 мм — 1025 т/мес. В настоящей статье рассмотрено производство термообработанной проволоки для пружин наиболее ответственного назначения.

В таблице приведены основные требования (по величине временного сопротивления разрыву σ_b , относительного сужения ψ , числу скручиваний и др.) различных стандартов к закаленно-отпущенной проволоке.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРУЖИННОЙ ПРОВОЛОКЕ

TECHNICAL REQUIREMENTS TO SPRING WIRE

Нормативный документ	σ_b , Н/мм ²	ψ , %	Число скручиваний	Другие свойства	Изготавливаемые виды пружин
ГОСТ 1071–81 (1А класс)	1570–1720	—	≥10	Перегибы, навивка, микроструктура	Различные виды, в том числе клапанные
ASTM A 877 / A 877M-17	1830–1970	≥40	—	Навивка	Клапанные
DIN EN 10270-2:2012, ГОСТ Р 58126–2018	1860–1960	≥45	≥4	Навивка	Со статической нагрузкой (FD), сцепления (TD), клапана (VD)
JIS G 3561–1994	1810–1960	≥40	—	Перегибы, навивка	Клапанные

Среди представленных стандартов наиболее жесткие и труднодостижимые требования (высокая прочность при мелкой микроструктуре проволоки из сталей 51ХФА и 70ХГФА) заложены в ГОСТ 1071–81. Однако гарантированное обеспечение повышенной прочности возможно при формировании крупноигольчатой микроструктуры (сорбита

или троостосорбита отпуска с игольчатой ориентацией не менее балла 3–4 шкалы 3 ГОСТ 8233–56). Для примера на рис. 1 приведена зависимость прочностных свойств от балла микроструктуры (балл игольчатой ориентации сорбита отпуска) для закаленно-отпущенной проволоки из сталей 68ГА, 51ХФА и 54SiCr6 (60С2ХА-Ш).

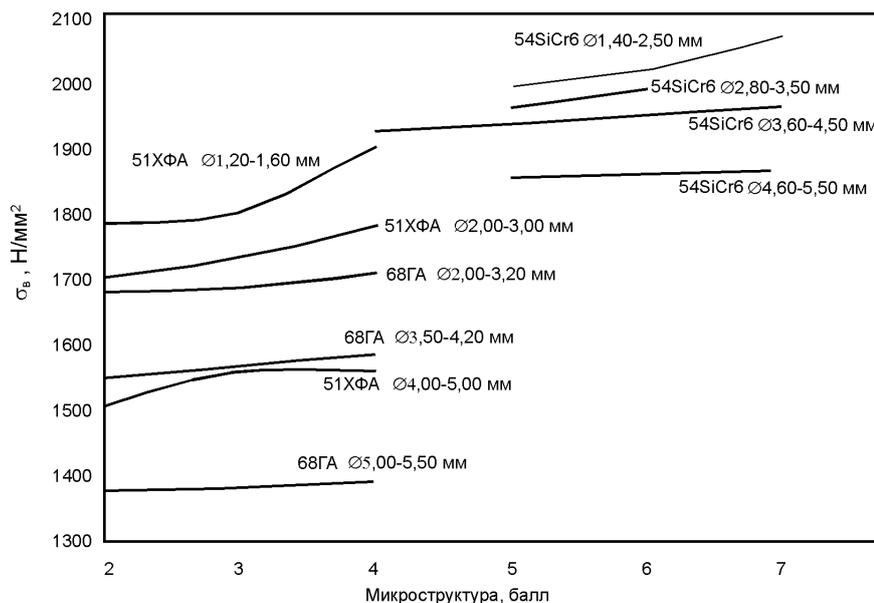


Рис. 1. График зависимости прочности проволоки от микроструктуры

Fig. 1. Graph of dependence of wire strength on microstructure

На рис. 2 приведены гистограммы средних значений прочности, относительного сужения и получаемая микроструктура (балл игольчатой ориентации сорбита отпуска) проволоки диам. 2,70–4,80 мм марки VDSiCr (54SiCr6) различных

производителей. Наибольшие значения прочности (свыше 1700 Н/мм²) наблюдаются у проволоки с сорбитом отпуска с игольчатой ориентацией балла 5–7.

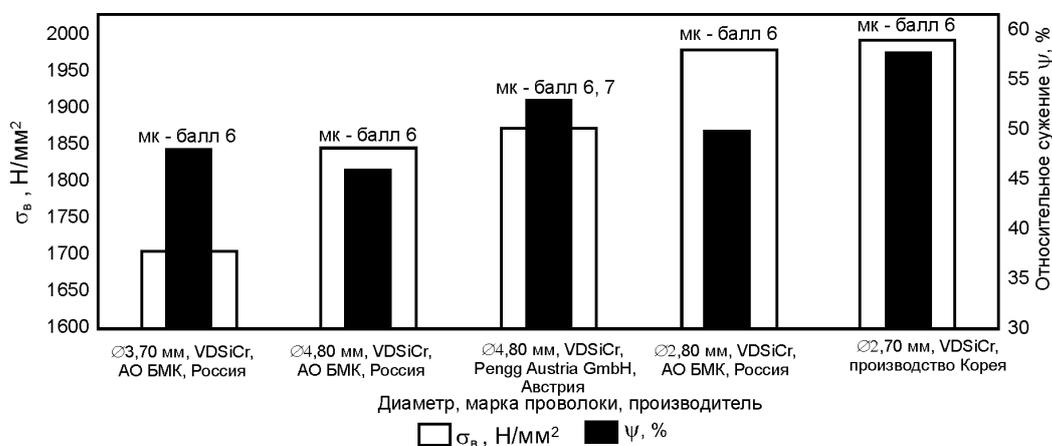


Рис. 2. Гистограммы уровней прочности, относительного сужения и микроструктуры (мк) проволоки VDSiCr

Fig. 2. Histograms of strength levels, reduction of area and microstructure (mk) of wire VDSiCr

На прочность и долговечность пружин также оказывает влияние качество поверхности проволоки. На поверхности пружинной заготовки допускается наличие окисных пленок и неглубоких локальных волочильных рисок, остальные дефекты поверхности не допускаются. Обезуглероженный слой материала также приводит к снижению механических свойств (особенно предела усталости), поэтому нормами допускается лишь наличие тонкого, частично обезуглероженного слоя, наличие слоя чистого феррита не допускается.

Отдельными стандартами нормируется размер неметаллических включений, увеличивающих склонность к растрескиванию стали при обработке и коррозии, снижающих усталостную прочность, усиливающих анизотропию свойств.

Проволока для клапанных пружин автомобильных двигателей в Россию импортируется. Отечественная закаленно-отпущенная проволока по ГОСТ 1071-81, ТУ 14-4-1195-82 и другим стандартам выпускается АО «Белорецкий металлургический комбинат» (БМК). Она предназначена в основном для производства механических пружин и деталей автомобилей ВАЗ. В 2015 г. предприятие начало освоение проволоки по EN 10270-2:2012 [2]. За рубежом изготовление закаленно-отпущенной пружинной проволоки осуществляется фирмами Suzuki Garphyttan (Швеция), Anbao (Китай), Kiswire (Южная Корея), Shinko Wire Co., Ltd (Япония) и др. Целью настоящей работы является сравнительный анализ и описание технологических процессов производства закаленно-отпущенной пружинной проволо-

ки ответственного назначения и разработка предложений по совершенствованию технологии изготовления отечественной конкурентоспособной продукции.

Технологическая схема производства ответственной закаленно-отпущенной пружинной проволоки, применяемая за рубежом, состоит из следующих операций: вихретоковый контроль катанки, скальпирование, отжиг, подготовка поверхности и волочение проволоки, закалка и отпуск, вихретоковый контроль проволоки, промывка. Отечественная технология производства термообработанной пружинной проволоки включает: отжиг катанки, подготовку поверхности и волочение передельной проволоки, патентирование, обточку, волочение, закалку и отпуск. В зависимости от марки стали, диаметра и требуемых свойств готовой продукции технология может быть сокращена или дополнена операциями промежуточных термообработок, волочения, обточки, т. е. зарубежная технологическая схема по составу операций аналогична отечественной, однако свойства получаемой проволоки имеют значимые отличия. Проведем сравнительный анализ применяемых операций.

В России термообработанная пружинная проволока по ГОСТ 1071-81 изготавливается из сталей 68ГА и 51ХФА для различных видов пружин. За рубежом для производства клапанных пружин автомобильных двигателей в мировой практике используется преимущественно заготовка по EN 10270-2:2012 из хромосилицистых и хромосилицистыванадиевых сталей. Для повышения прочности, снижения склонности к обезугле-

роживанию, повышения сопротивления ползучести и уменьшения массы пружин стали легируют ниобием, кобальтом, молибденом, вольфрамом, медью, титаном, бором и азотом. Рессорно-пружинные стали специального назначения (высоколегированные мартенситные, мартенситно-старяющие и аустенитные стали) обладают высоким пределом упругости, а также коррозионной стойкостью, теплостойкостью (сопротивлением релаксации при повышенных температурах) и т. д. Температура эксплуатации таких пружин находится в интервале от 200 до 400 °С и выше [3].

Сталь выплавляют в электропечах, используют электрошлаковый переплав, применяют интенсивное перемешивание в ковше и т. п. Это обеспечивает чистоту металла по неметаллическим включениям. Заготовка из рессорно-пружинной стали должна иметь однородную микроструктуру. В макроструктуре не должно быть грубых дефектов (ликвации, усадочной раковины, флокенов и др.), снижающих технологичность переработки металла и свойства готовой проволоки.

Прокатка катанки осуществляется на непрерывных высокоскоростных проволочных станах с замедленным охлаждением под теплоизолирующими колпаками [4]. Возможно производство катанки (из стали с содержанием углерода 0,50–0,70 %) с проведением закалки и отпуска, нагревом до температуры ниже температуры отпуска, приложением к металлу растягивающего усилия и охлаждением водой до комнатной температуры. Проволока, изготовленная из данной катанки, обладает лучшей вязкостью, применяется для производства пружин подвески автомобилей [5].

Для повышения пластичности перед волочением передельной проволоки проводится отжиг катанки в колпаковых печах с защитной атмосферой (например, в печах фирм FIB Belgium SA или EBNER). Далее осуществляется травление катанки в растворе соляной кислоты, промывка в воде и нанесение буры. При использовании катанки с минимальной овальностью и дефектностью, однородной микроструктурой операция отжига может быть исключена.

Удаление дефектов поверхности и обезуглероженного слоя передельной проволоки осуществляется обточкой или скальпированием. Эффективным способом обработки является скальпирование, обеспечивающее равномерное снятие металла и гладкую поверхность в отличие от обточки, оставляющей неглубокие винтовые риски. На сегодняшний день хорошо зарекомендовали себя волочильно-скальпирующие установки фирмы KIESELSTEIN.

Волочение проволоки готового размера, как правило, проводится с суммарным обжатием до 80 %. Для обеспечения удовлетворительной

технологичности металла передельную заготовку подвергают патентированию (или нормализации), обеспечивающему высокодисперсную микроструктуру. Для увеличения производительности процесса изготовления проволоки рекомендуется использовать многониточные совмещенные линии патентирования и подготовки поверхности к волочению (например, фирм FIB Belgium SA или Wire KÖRNER).

Отдельное внимание при производстве термообработанной проволоки уделяется разработке маршрутов волочения (особенно при протяжке проволоки готового размера). Выбранные степени суммарных и единичных деформаций, геометрия каналов волок, условия трения, деформационный разогрев проволоки и скоростные условия волочения влияют на напряженное состояние металла, формирование однородной структуры и качество поверхности проволоки после закалки и отпуска.

Суммарное обжатие при волочении проволоки, предназначенной для закалки и отпуска, составляет 58–80 % (в зависимости от марки стали и микроструктуры заготовки), единичные деформации от 15 до 25 % способствуют наилучшей проработке сечения металла в очаге деформации.

Волочение проволоки проводят на прямоочных волочильных станах (например, фирм Ernst Koch, MFL Group, GCR Eurodraw, KIESELSTEIN Group, SAMP), обладающих автоматическим регулированием уровня противонапряжения и скоростей тянущих барабанов без накопления проволоки, системой автоматического водяного и воздушного охлаждения. Применяются совмещенные линии подготовки поверхности металла к волочению и волочильных машин (в данном случае отсутствует необходимость использования совмещенных агрегатов для патентирования и подготовки поверхности к волочению).

Финишной операцией при производстве рассматриваемой продукции является закалка в масле и отпуск (например, в расплаве свинца). В результате термообработки формируется новая микроструктура (сорбит или троостосорбит отпуска), определяющая свойства готовой проволоки (временное сопротивление разрыву, предел упругости, релаксационную стойкость, прямолинейность и др.). Характерной особенностью закаленно-отпущенной проволоки является высокий коэффициент отношения предела текучести к прочности (около 0,90, у холоднотянутой пружинной проволоки — 0,50) [4].

Закалка и отпуск проволоки проводится в многониточных проходных печах или в линии с индукционным нагревом (например, фирмы Redyne). Преимущества подобных линий — возможность быстрой настройки режима обработки в зависимости от марки стали и диаметра про-

волоки, фиксирование температуры проволоки на протяжении всего агрегата, наличие вихретокового дефектоскопа, быстрый запуск и остановка процесса за счет сокращения времени нагрева и остывания печи, повышение экологичности и пожарной безопасности процесса.

Таким образом, улучшенный химический состав рессорно-пружинной стали, более совершенная технология, современное высокопроизводительное оборудование, используемые зарубежными предприятиями, обеспечивают требуемый комплекс свойств закаленно-отпущенной проволоки для ответственных видов пружин.

В условиях высокой потребности отечественного рынка метизов в качественной проволоке-заготовке для производства высоконагружаемых ответственных видов пружин необходима организация технологии стабильного производства закаленно-отпущенной проволоки. Обеспечение высоких потребительских свойств продукции гарантировано при использовании качественно выплавленных легированных сталей, заготовок (и катанки) с минимальной структурной и поверхностной дефектностью. Проектирование

рациональных с точки зрения напряженного состояния и энергозатрат маршрутов волочения проволоки готового размера обеспечивает подготовку металла к формированию однородной микроструктуры после закалки и отпуска. Это можно реализовать, используя методики, изложенные в работах [6–9], позволяющие оценить напряженное состояние проволоки при деформировании, нагрузку на волоку и энергозатраты на волочение проволоки. Это позволяет получать проволоку высокого уровня качества и минимизировать затраты на ее производство. Повышению свойств проволоки способствует применение высокотемпературной (ВТМО) или низкотемпературной (НТМО) термомеханической обработки. ВТМО проводят с единичной деформацией, равной 25 %. При НТМО для окончательной обработки применяется единичная деформация 7 %, для промежуточной — 20–25 % [10, 11]. Для увеличения производительности и качества проведения всех операций необходимо использовать современное прокатное, термическое и волочильное оборудование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дуденков С.В., Пономарева О.С. Маркетинговое исследование рынка потребителей закаленно-отпущенной заготовки в рамках импортозамещения // Современный менеджмент: теория и практика. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции / Под общ. ред. Н.В. Кузнецовой. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2020. С. 67–71.
2. Пыхов Л.Э. Освоение производства термически обработанной пружинной проволоки из стали 54SiCr6 в условиях АО «БМК» / Л.Э. Пыхов, Э.Ф. Галлямов, Н.Ю. Сметнёва // Сталь. 2018. № 6. С. 39–41.
3. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Производство пружинной проволоки: учебное пособие. — Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2013. — 151 с.
4. Сметнёва Н.Ю., Харитонов В.А. Состояние и перспективы развития производства пружинной проволоки // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / Под ред. А.Б. Моллера. — Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2018. Вып. 24. С. 65–74.
5. Заявка 59-229415 Японии, МКИ С 21 D 8/06, С 21 D 9/02. Производство стальной проволоки для пружин с высоким сопротивлением просадке / М. Тэруюки, М. Норхиса // Заявл. 08.06.1983; опубл. 22.12.84.
6. Харитонов В.А., Сметнёва Н.Ю. Совершенствование режимов волочения и ресурсосбережение при производстве углеродистой проволоки // Сталь. 2020. № 3. С. 49–54.
7. Харитонов В.А., Сметнёва Н.Ю., Усанов М.Ю., Пыхов Л.Э. Выбор рациональных режимов волочения термически обработанной стальной пружинной проволоки // Сталь. 2019. № 11. С. 42–47.
8. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Совершенствование методики расчета маршрутов волочения для высокоуглеродистых сталей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 8. С. 92–96.
9. Харитонов В.А., Сметнёва Н.Ю. Направления повышения конкурентоспособности пружинной закаленно-отпущенной проволоки // Черные металлы. 2020. № 9 (1065). С. 49–55.
10. Комарова Т.В. Повышение уровня и стабильности механических свойств термически обрабатываемой пружинной проволоки из углеродистых и низколегированных сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Горький, 1980. — 26 с.
11. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т. II. — М.: Металлургия, 1968. — 576 с.

Поступила 6 июля 2021 г.

REFERENCES

1. Dudenkov S.V., Ponomareva O.S. *Marketingovoe issledovanie rynka potrebitelei zakalenno-otpushchennoi zagotovki v ramkakh importozameshcheniya* [Marketing research of the market of consumers of hardened-tempered billets within the framework of import substitution]. *Sovremennyy menedzhment: teoriya i praktika. Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Modern management: theory and practice. Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kuznetsova N.V. ed. Magnitogorsk: Izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2020, pp. 67–71. (In Russ.).

2. Pykhov L.E., Gallyamov E.F., Smetneva N.Yu. Mastering the production of heat-treated spring wire from 54SiCr6 steel under the conditions of JSC "BMK". *Stal'*, 2018, no. 6, pp. 39–41. (In Russ.).
3. Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. *Proizvodstvo pruzhinnoi provoloki* [Spring wire production]. Magnitogorsk: GOU VPO MGTU, 2013, 151 p. (In Russ.).
4. Smetneva N.Yu., Kharitonov V.A. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya proizvodstva pruzhinnoi provoloki* [State and prospects for the development of spring wire production]. *Modelirovanie i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem: mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Modeling and development of metal pressure processing processes: international sat. scientific works]. Moller A.B. ed. Magnitogorsk: Izd-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2018, no. 24, pp. 65–74. (In Russ.).
5. Teruyuki M., Nornkhisa M. *Proizvodstvo stal'noi provoloki dlya pruzhin s vysokim soprotivleniem prosadke* [Production of steel wire for springs with high resistance to subsidence]. Application Japan no. 59-229415. IPC C 21 D 8/06, C 21 D 9/02. 1984.
6. Kharitonov V.A., Smetneva N.Yu. Improvement of drawing modes and resource saving in the production of carbon wire. *Stal'*, 2020, no. 3, pp. 49–54. (In Russ.).
7. Kharitonov V.A., Smetneva N.Yu., Usanov M.Yu., Pykhov L.E. The choice of rational modes of drawing heat-treated steel spring wire. *Stal'*, 2019, no. 11, pp. 42–47. (In Russ.).
8. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. The Improvement in the Methodology for the Calculation of the Drawing Sequences for the High carbon Steels. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2017, no. 8, pp. 92–96. (In Russ.).
9. Kharitonov V.A., Smetneva N.Yu. Directions of increasing the competitiveness of spring hardened-tempered wire. *Chernye metally*, 2020, no. 9 (1065), pp. 49–55. (In Russ.).
10. Komarova T.V. *Povyshenie urovnya i stabil'nosti mekhanicheskikh svoystv termicheski obrabatyvaemoy pruzhinnoi provoloki iz uglerodistykh i nizkolegirovannykh stalei: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Increasing the level and stability of the mechanical properties of heat-treated spring wire made of carbon and low-alloy steels. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Gor'kii, 1980, 26 p. (In Russ.).
11. Bernshtein M.L. *Termomekhanicheskaya obrabotka metallov i splavov. T. II* [Thermomechanical processing of metals and alloys. Vol. II]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 576 p. (In Russ.).

Received July 6, 2021