



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 669.018.295
EDN SYLLPN

ВЛИЯНИЕ ТИПОРАЗМЕРА ОБРАЗЦОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Г.Д. Мотовилина, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49, e-mail: npk3@crism.ru

Е.С. Соколов, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

Е.И. Хлусова, д-р техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

С целью решения проблемы достоверной оценки качества листового проката выполнен анализ влияния типоразмера цилиндрических образцов на результаты испытаний механических свойств при одноосном растяжении высокопрочной судостроительной стали марки 09ХН2МД.

Показано, что с учетом неоднородной структуры, формирующейся при закалке с прокатного нагрева листового проката толщиной 24 и 30 мм, выбор типоразмера образцов на растяжение согласно ГОСТ 1497 оказывает определяющее влияние на оценку качества высокопрочной стали.

Ключевые слова: низкоуглеродистая высокопрочная сталь, одноосное растяжение, типоразмер образцов, структура, механические свойства при одноосном растяжении, излом, деформационная способность.

Для цитирования: Мотовилина Г.Д. Влияние типоразмера образцов на механические свойства высокопрочной судостроительной стали при одноосном растяжении / Г.Д. Мотовилина, Е.С. Соколов, Е.И. Хлусова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 114 — 124. — EDN SYLLPN.

INFLUENCE OF SPECIMENS TYPESIZE ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH SHIPBUILDING STEEL DURING UNIAXIAL TENSION

G.D. Motovilina, PhD, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49, e-mail: npk3@crism.ru

E.S. Sokolov, Engineer, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

E.I. Khlusova, DSc, Professor, NRC Kurchatov Institute — CRISM Prometey, 191015 Russia, St. Petersburg, Shpalernaya ul., 49

An analysis of cylindrical specimens typesize influence on mechanical properties during uniaxial tension has been carried out for reliable estimation of high-strength shipbuilding 09CrNi2MoCu steel grade quality.

It is shown that selection of specimens typesize for tension test according to GOST 1497 has a determinant influence on quality estimation of high-strength steel due to heterogeneous structure forming in the quenching process after rolling of the plates with 24 and 30 mm in thickness.

Key words: low-carbon high-strength steel, uniaxial tension, typesize of specimens, structure, mechanical properties during uniaxial tension, fracture, deformation capacity.

For citation: Motovilina G.D., Sokolov E.S., Khlusova E.I. Influence of specimens typesize on mechanical properties of high-strength shipbuilding steel during uniaxial tension. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 114 — 124. EDN SYLLPN. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Нормативной документацией на поставку листового проката высокопрочных марок стали судостроительного назначения регламентируются испытания на одноосное растяжение цилиндрических образцов различных типоразмеров. Выбор типа и размера образцов для проведения испытания на одноосное растяжение зависит от толщины листового проката и возможностей испытательного оборудования.

Для листового проката низкоуглеродистой высокопрочной стали 09ХН2МД толщиной свыше 60 мм регламентировано использовать цилиндрические образцы на одноосное растяжение, тип и размер образцов на растяжение также нормирован в технической документации. При вырезке образцы следует располагать у поверхности или на 1/3 толщины листового проката. Величина диаметра рабочей части образца влияет на положение оси образца относительно поверхности проката: чем больше диаметр рабочей части образца, тем дальше от поверхности проката будет расположена его ось. Следует отметить, что исследования влияния структуры в месте вырезки образца по сечению листового проката на механические свойства, в литературе практически не встречаются.

С целью снижения затрат заводы-изготовители выступают с предложениями изменять типоразмер образцов. При этом не учитывается, что на результатах испытания образцов может сказаться как влияние масштабного фактора (диаметр рабочей части образца), так и расположение оси образца в разных областях по сечению, поскольку после горячей деформации перед ускоренным охлаждением при закалке с прокатного нагрева (ЗПН) с отпуском в листовом прокате может сформироваться неоднородная (по размеру зерна) структура аустенита, которую связывают с неоднородным распределением температурно-деформационных воздействий по толщине листа. В свою очередь, размер зерна аустенита оказывает влияние на устойчивость аустенита при фазовом превращении, определяя состав и морфологию сформированной в результате ЗПН структуры. Для стали марки 09ХН2МД это может быть мартенсит или бейнит в различных соотношениях. Ранее было установлено, что в листах стали подобной композиции после закалки с печного нагрева и последующего высокого отпуска при увеличении толщины проката происходит снижение доли структур реечной морфологии [1, 2]. При охлаждении с прокатного нагрева неоднородность конечной структуры по сечению листового проката после фазового превращения усиливается [3, 4]. Последующий отпуск не может изменить соотношение фаз, мартенсита или бейнита, в структуре, но в зависимости от режима определяет тип, морфологию и распределение в них карбидной фазы [4, 5].

Целью работы являлось определение влияния типоразмера цилиндрических образцов на механические свойства листового проката высокопрочной хромоникельмолибденовой стали марки 09ХН2МД при одноосном растяжении.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования была выбрана низкоуглеродистая высокопрочная сталь 09ХН2МД, фактический химический состав которой представлен в табл. 1 [3].

Таблица 1

Фактический химический состав стали марки 09ХН2МД

| Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | |
|----------------------------|------|------|-------|-------|------|------|----------|-------|------------|
| C | Si | Mn | Cr+Mo | Cu+Ni | V | Al | S | P | Ca |
| | | | | | | | не более | | по расчету |
| 0,09 | 0,19 | 0,41 | 0,82 | 2,60 | 0,04 | 0,02 | 0,010 | 0,015 | 0,03 |

Для исследования были отобраны образцы от листов толщиной 24 и 30 мм, изготовленных на стане «5000» ПАО «Северсталь» с использованием ЗПН и последующего отпуска при температуре 635 — 640 С°. В табл. 2 представлены результаты сдаточных испытаний на одноосное растяжение, определенные согласно требованиям ГОСТ 1497-2023.

Таблица 2

Результаты сдаточных испытаний на одноосное растяжение исследуемых листов высокопрочной стали марки 09ХН2МД толщиной 24 и 30 мм после закалки с прокатного нагрева

| Место отбора проб | 24 мм | | | | 30 мм | | | |
|-------------------|------------------|----------------------|----------------|-----------------|------------------|----------------------|----------------|-----------------|
| | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ_5 , % | KV^{-40} , Дж | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ_5 , % | KV^{-40} , Дж |
| «Голова» листа | 710 | 630 | 19,5 | 303; 282 | 690 | 610 | 22,5 | 276; 267 |
| «Хвост» листа | 720 | 630 | 26,0 | 294; 288 | 710 | 630 | 22,5 | 246; 261 |

Для определения и сравнительного анализа прочностных и пластических характеристик представленного листового проката были проведены испытания на растяжение цилиндрических образцов типа III № 6 с диаметром рабочей части 6 мм (\varnothing 6 мм), типа II № 4 — \varnothing 10 мм и типа III № 3 — \varnothing 15 мм при комнатной температуре по ГОСТ 1497-2023 на универсальной разрывной машине «Zwick Z250». Схема вырезки образцов приведена на рис. 1.

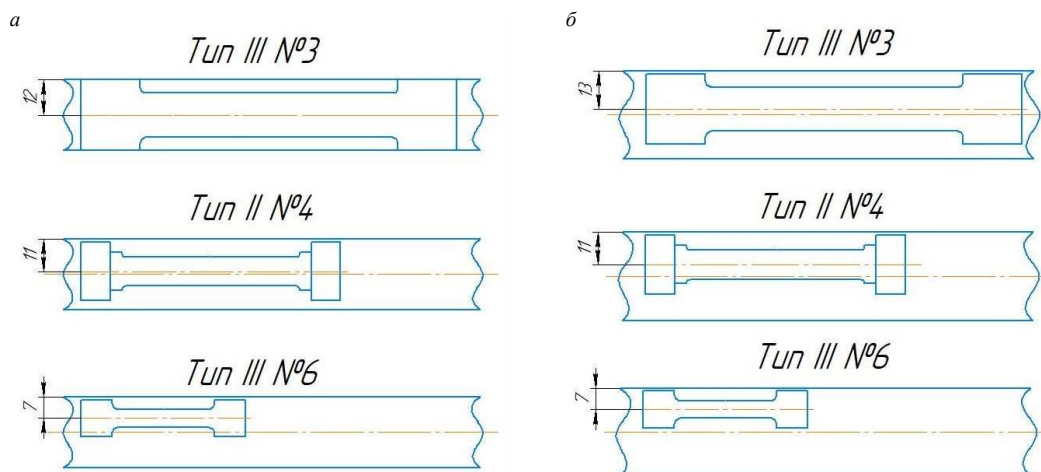


Рис. 1. Расположение образцов по толщине проката: а — толщина проката 24 мм; б — толщина проката 30 мм

На образцах типа II № 4 и типа III № 3, отобранных от листового проката толщиной 24 мм, ось рабочей части совпадает с серединой листа. Для образцов типа III № 6 от листов толщиной 24 мм, образцов типа II № 4 и типа III № 6 от листа толщиной 30 мм центр рабочей части расположен ближе к поверхности листа. Образцы вырезали от каждого конца листа (обозначение «Г» и «Х»).

Исследование структуры по сечению листов и деформированной рабочей части образцов после испытаний на одноосное растяжение выполнено методами оптической металлографии микроскопом «Axiovert 40 MAT» с цифровым анализатором изображения.

Методом растровой электронной микроскопии с использованием РЭМ «Philips 535» исследована поверхность разрушения образцов после испытания на одноосное растяжение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены значения прочностных характеристик в зависимости от диаметра испытанных образцов, на рис. 3 — значения их относительного удлинения и относительного равномерного удлинения, величина которого зависит от типа образующейся структуры [6].

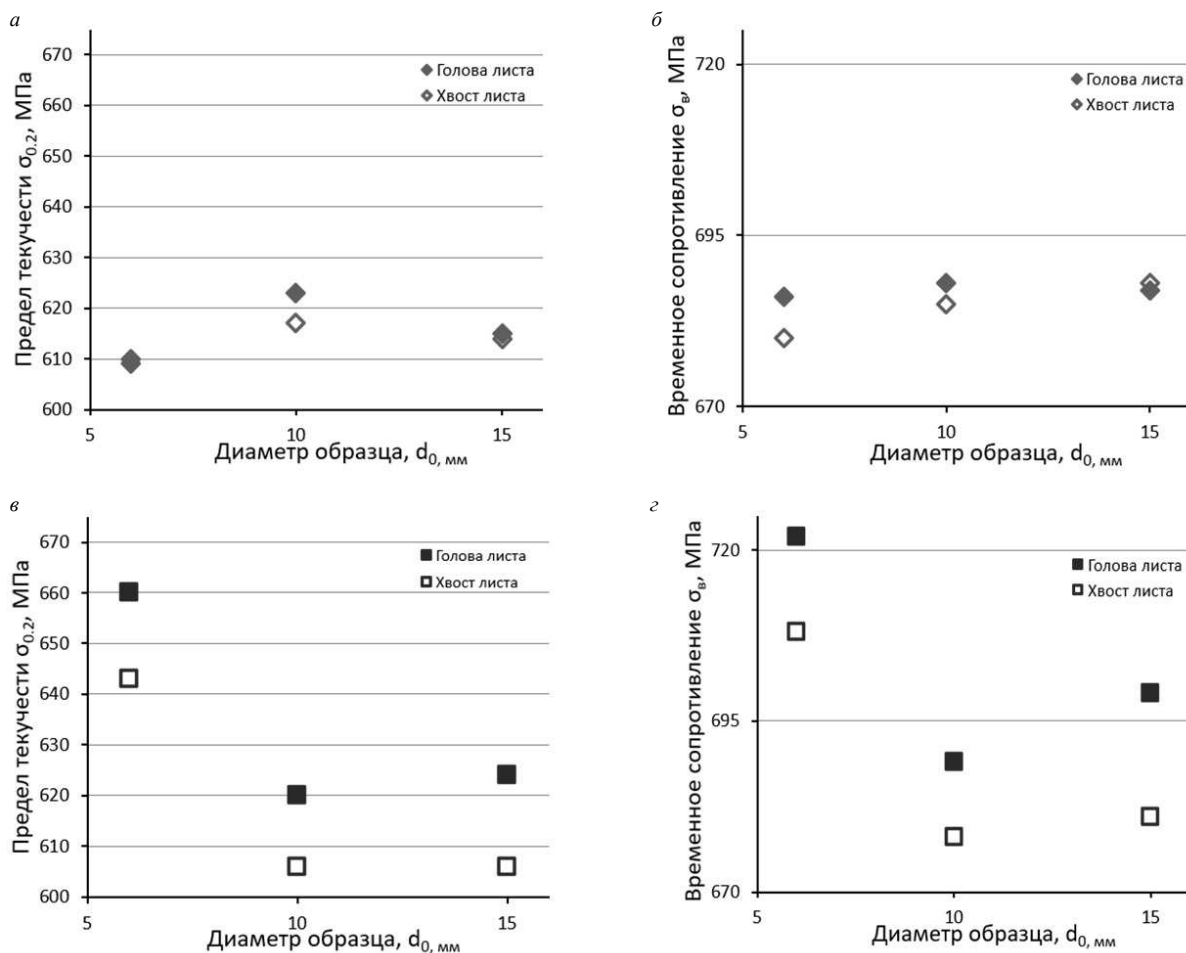


Рис. 2. Зависимости прочностных характеристик листового проката от диаметра испытанных образцов:
а, б — лист толщиной 24 мм; в, г — лист толщиной 30 мм

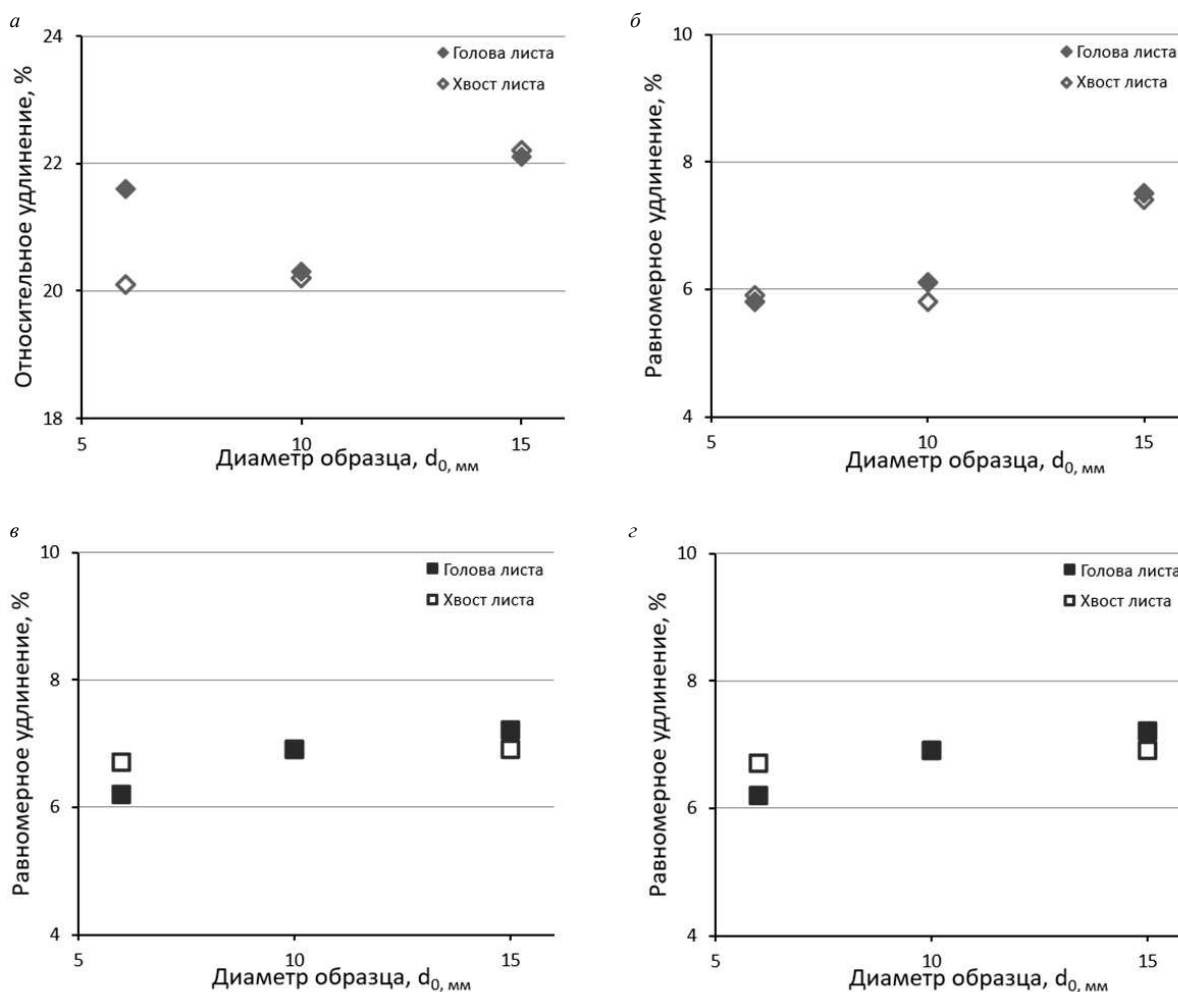


Рис. 3. Зависимости относительного и равномерного удлинения листового проката от диаметра испытанных образцов: лист толщиной 24 мм (а, б); лист толщиной 30 мм (в, г)

Из рис. 2 следует, что прочностные характеристики листового проката толщиной 24 мм, определенные на образцах различных типоразмеров, отличаются незначительно.

Значения прочностных характеристик по результатам испытаний образцов, изготовленных из листового проката толщиной 30 мм, отличаются более значительно: разница пределов текучести и временного сопротивления между образцами типа III № 6 и типа II № 4, типа III № 3 составляет 20 — 30 МПа. Для каждого конца листа у листов разной толщины для образцов с диаметром рабочей части 10 и 15 мм (тип II № 4 и тип III № 3 соответственно) получены близкие значения предела текучести и временного сопротивления, что может быть связано с местом вырезки образцов.

Результаты анализа пластических характеристик, представленные на рис. 3, не позволяют оценить влияние типа и размера образцов на относительное и равномерное удлинение: разброс значений относительного удлинения составляет 0,4 — 0,7 %, относительного равномерного удлинения — 0,2 — 0,6 %. В целом, уровень относительного удлинения > 20 %, относительного равномерного удлинения > 5,5 %.

Правила отбора проб для проведения испытаний и исследования листового проката толщиной свыше 60 мм оговорены в нормативной документации: для определения механических свойств пробы вырезают от поверхности в средней трети ширины листов из припусков на концах листов в поперечном направлении по отношению к направлению прокатки.

Структура хромоникельмолибденовой стали 09ХН2МД, сформированная в результате деформационно-термической обработки и высокого отпуска, представлена на рис. 4. Она образована преимущественно бейнитом реечной и гранулярной морфологии. В середине листов по сечению наблюдается структурная полосчатость.

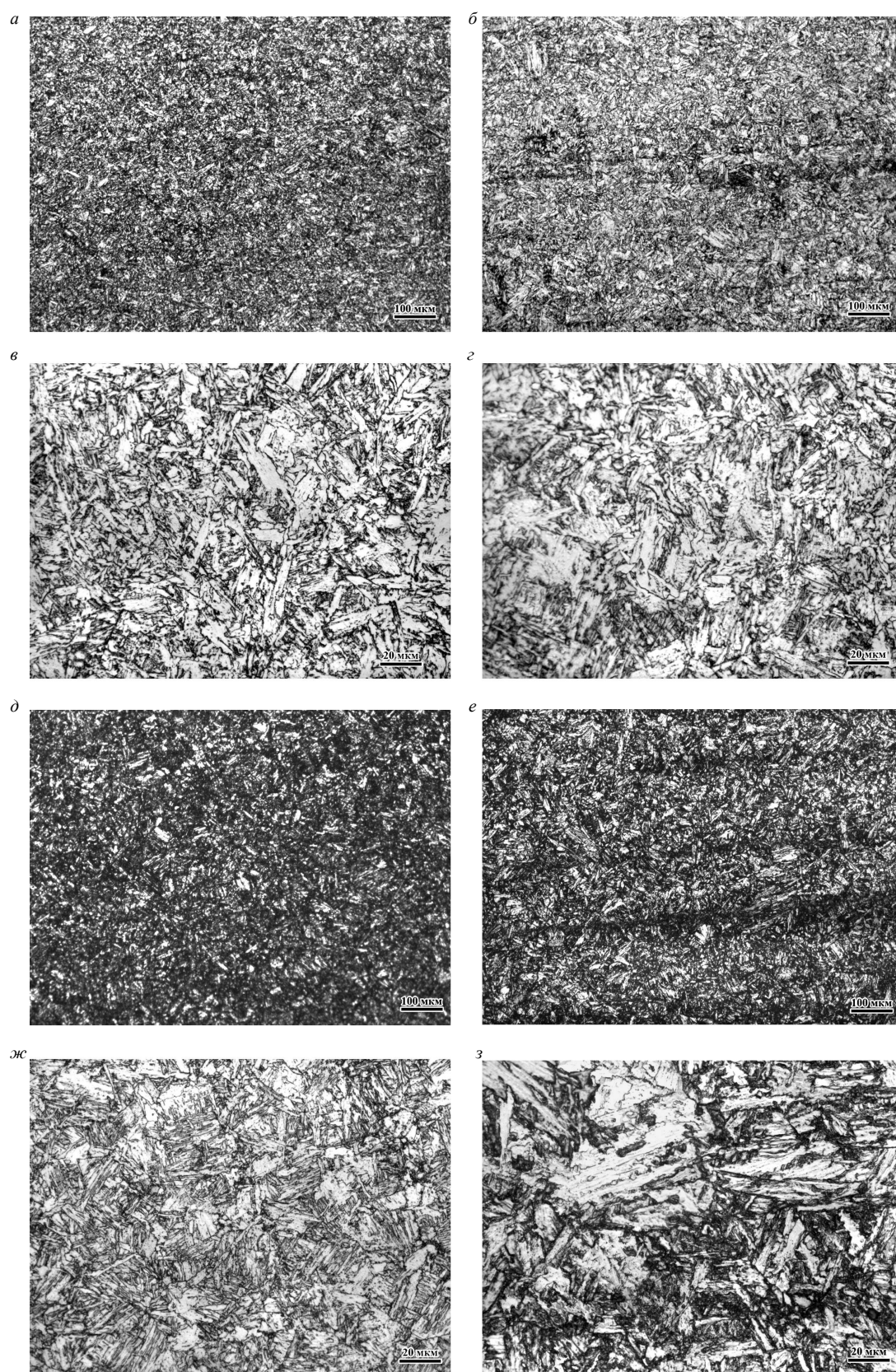


Рис. 4. Структура листового проката стали 09XH2MD толщиной 24 мм (а — г) и толщиной 30 мм (д — з); поверхность листа (а, в, д, ж); середина листа (б, г, е, з)

Структурные составляющие у поверхности и в середине сечения листов имеют различную дисперсность, что особенно заметно в листах толщиной 30 мм.

В зависимости от типоразмера расположение осей образцов из листового проката толщиной 24 и 30 мм находится на различных расстояниях от поверхности проката. Из приведенной на рис. 5 и 6 схемы вырезки образцов видны структурные различия в области поперечного сечения рабочей части образцов различных типоразмеров, используемых для испытаний на одноосное растяжение.

Состав и морфология структурных составляющих меняется с увеличением диаметра рабочей части испытываемого образца на одноосное растяжение. В образце диаметром 15 мм, из листа толщиной 24 мм, содержание бейнита гранулярной морфологии увеличивается с 10 до 30 %, в сравнении с образцом с диаметром рабочей части 6 мм, рис. 5.

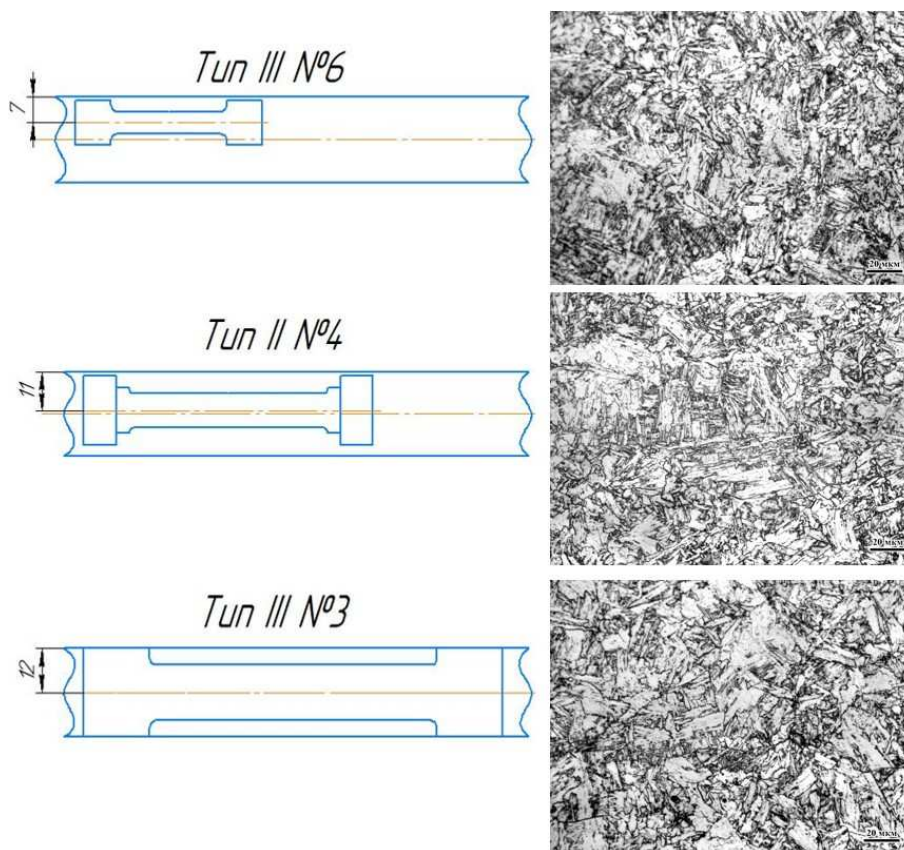


Рис. 5. Схема вырезки образцов из листового проката толщиной 24 мм и структура в рабочей части по оси образца

С увеличением диаметра рабочей части образцов из проката толщиной 30 мм наблюдается увеличение доли гранулярного бейнита с 8 до 30 %, при этом растут размеры областей реечного бейнита. По мере удаления от поверхности листа усиливается разнотернистость (рис. 6).

Анализ и оценка размеров структурных составляющих в рабочей части образцов, изготовленных из листа толщиной 24 мм, показала, что размеры наиболее крупных кристаллитов бейнита гранулярной морфологии не превышают 10 мкм у поверхности и 40 мкм — в середине рабочей части по толщине (рис. 5). Доля крупных бейнитных кристаллитов размерами 40 — 60 мкм наиболее высока в середине рабочей части по толщине образца типа III № 3 — $\varnothing 15$ мм от листа толщиной 30 мм (рис. 6).

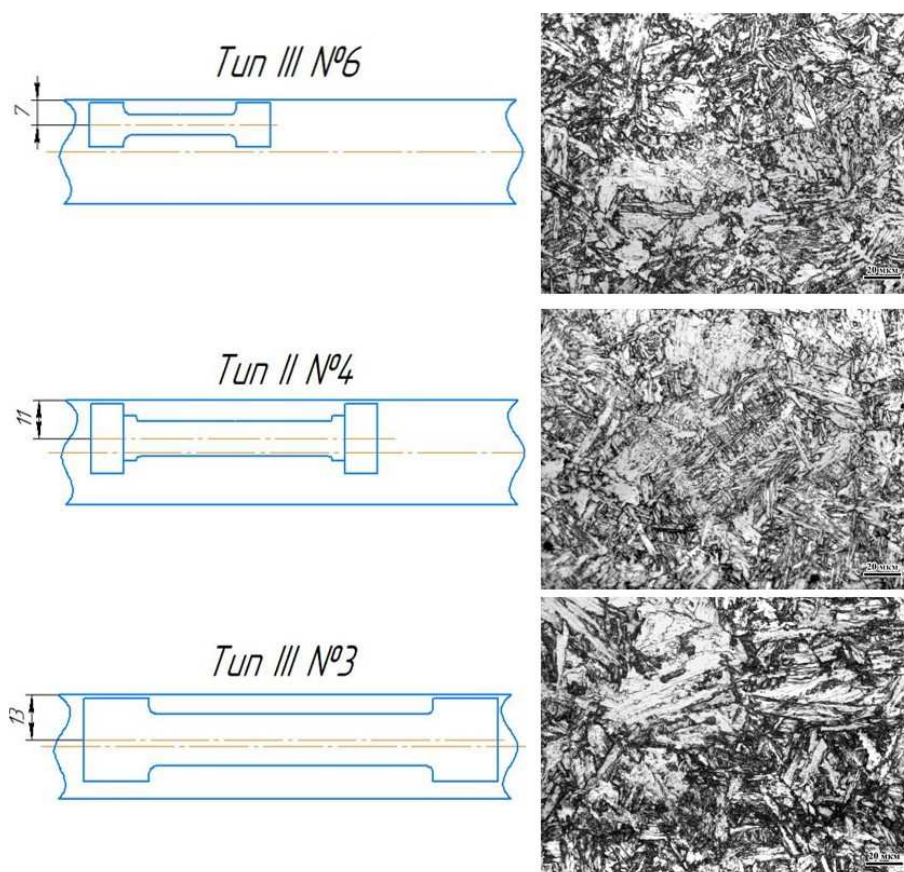


Рис. 6. Схема вырезки образцов из листового проката толщиной 30 мм и структура в рабочей части по оси образца

Наблюдаемые структурные изменения указывают на возможность при одинаковых технологических параметрах производства формирования структуры разного состава и морфологии в поверхностном слое и в середине листового проката листов толщиной 24 и 30 мм.

Лист толщиной 24 мм обладает более однородной и равномерной структурой по всей толщине проката, тогда как в листе толщиной 30 мм структура вблизи поверхности отличается повышенной дисперсностью (рис. 4). В результате образцы типа III № 6, расположенные ближе к поверхности листа, обладают более высокой прочностью по сравнению с образцами, рабочая часть которых расположена в середине проката. Изменение структуры в центральной области сечения листа приводит к снижению прочности, но уровень относительного удлинения при этом повышается на 1 — 2 % (рис. 2, 3).

Исследование изломов испытанных образцов с использованием растровой электронной микроскопии на приборе РЭМ «Philips 535» выявило, что все типы образцов демонстрируют вязкий транскристаллитный характер разрушения. При этом на поверхностях изломов образцов типа II № 4 — $\varnothing 10$ мм и особенно типа III № 3 — $\varnothing 15$ мм наблюдались трещины расщепления, ориентированные преимущественно вдоль направления проката (рис. 7, 8).

При разрушении образцов типа III № 3 — $\varnothing 15$ мм (рис. 7ж, 8ж) формируются наиболее значительные по ширине и протяженности трещины расщепления. Возникновение таких трещин, несомненно, обусловлено высокими нормальными растягивающими напряжениями в сочетании со структурной неоднородностью проката, а именно с ярко выраженной полосчатостью [7], наблюдаемой в средней части листа по сечению.

Темные полосы в структуре материала, состоящие из мелких бейнитных кристаллов, образуются вследствие сохранения химической неоднородности (дендритной структуры) в листах после ТМО и ЗПН с отпуском [8]. Эти полосы оказывают влияние на распределение напряжений в материале, что способствует образованию микротрещин на границе между структурными областями с различной степенью фрагментации (рис. 7з, 8з).

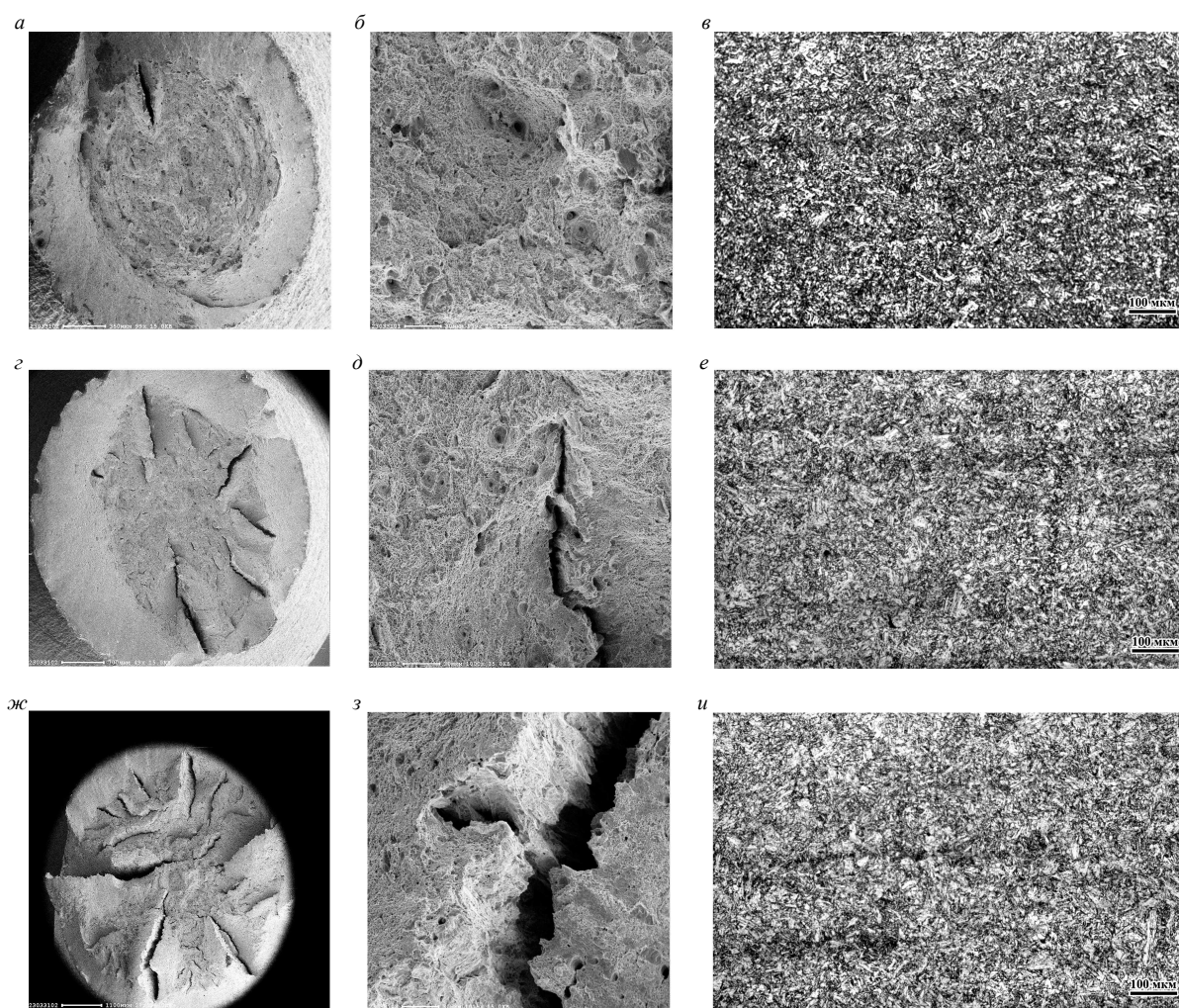


Рис. 7. Прокат толщиной 24 мм. Типичный вид поверхности разрушения и микроструктура у поверхности излома образцов: тип III № 6 с диаметром рабочей части 6 мм (а — в); тип II № 4 с диаметром рабочей части 10 мм (з — е); тип III № 3 (жс — и) с диаметром рабочей части 15 мм

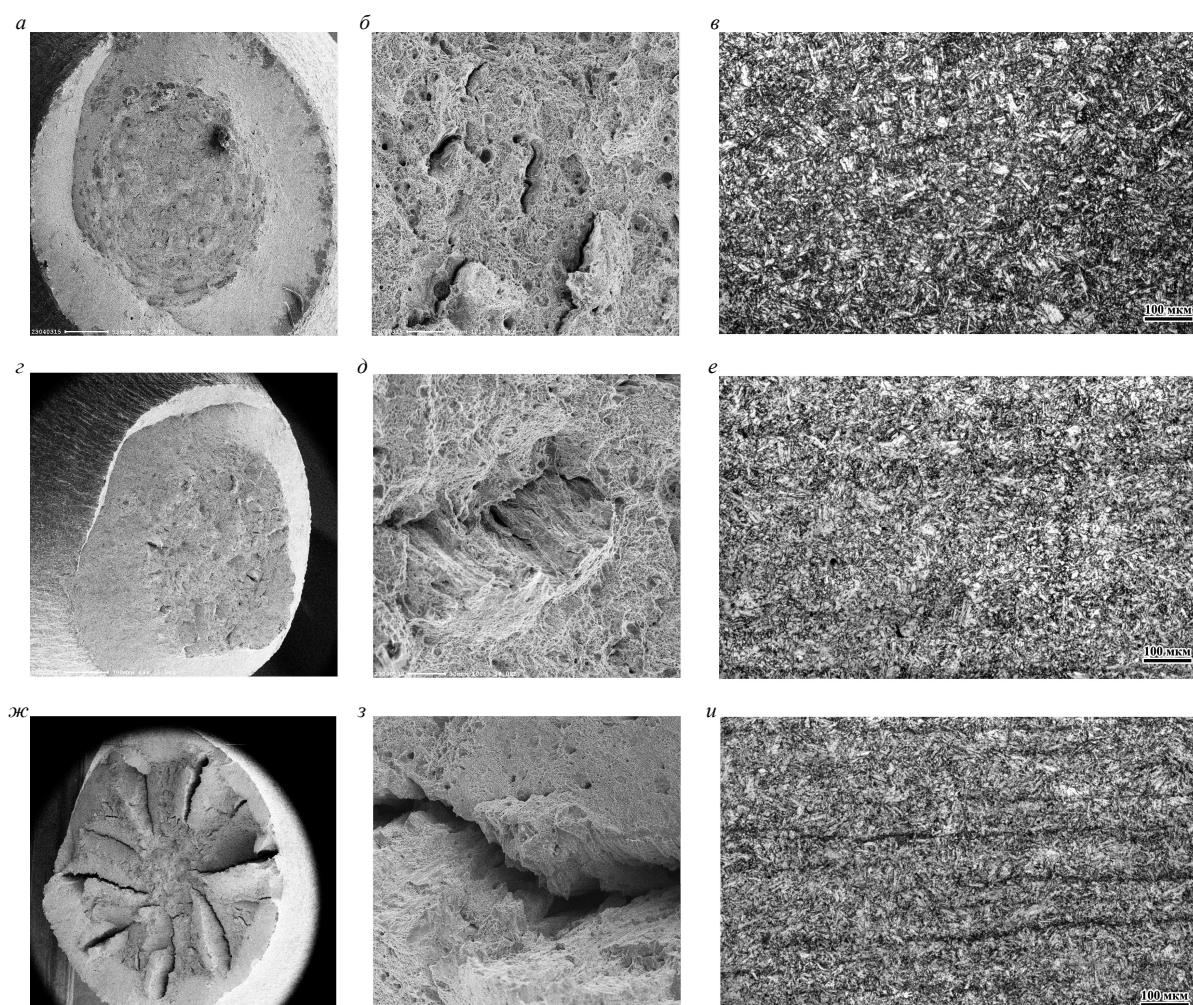


Рис. 8. Прокат толщиной 30 мм. Типичный вид поверхности разрушения и микроструктура у поверхности излома образцов: тип III № 6 с диаметром рабочей части 6 мм (а — в); тип II № 4 с диаметром рабочей части 10 мм (г — е); тип III № 3 (ж — и) с диаметром рабочей части 15 мм

ВЫВОДЫ

Параметры цилиндрических образцов, а именно диаметр рабочей части и место расположения ее оси, оказывают существенное влияние на значения предела текучести и временное сопротивление листового проката толщиной 30 мм при одноосном растяжении. Влияние этих параметров на свойства при одноосном растяжении образцов от листа толщиной 24 мм менее выражено. Это обусловлено структурными особенностями: увеличением доли гранулярного бейнита и ростом размеров областей реечного бейнита в середине по сечению листов.

В связи с неоднородностью структуры, вариациями фазового состава и размеров структурных элементов, по толщине листа испытание образцов типа III № 6, ось рабочей части которых расположена на расстоянии 7 мм от поверхности листового проката, приводит к завышению значений пределов текучести и временного сопротивления на 20 — 30 МПа по сравнению с образцами типа II № 4 и типа III № 3, ось рабочей части которых расположена в центре листа по толщине.

Установлено, что для проката высокопрочной стали 09ХН2МД исследуемых толщин структурные изменения в середине листа, способствующие снижению прочностных свойств, не влияют на уровень относительного удлинения $>5,5\%$.

Структурная полосчатость, являющаяся результатом возможных технологических отклонений при производстве листового проката, способствует образованию трещин расщепления в изломах образцов. Наиболее широкие и протяженные трещины расщепления образуются на образцах типа III № 3, в которых после закалки с прокатного нагрева структурная полосчатость особенно выражена.

Для подробного анализа влияния структурной неоднородности на результаты испытаний механических свойств листового проката широкого сортамента и статистически значимых выводов требуется проведение дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлусова Е.И. Влияние легирования на структуру и свойства высокопрочной хладостойкой стали после термической и термомеханической обработки / Е.И. Хлусова, С.А. Голосиенко, Г.Д. Мотовилина, У.А. Пазилова // Вопросы материаловедения. — 2007. — № 1 (49). — С. 20 — 32.
2. Куртева К.Ю. Изменение структуры и свойств по сечению толстолистового проката бейнитно-мартенситной стали / К.Ю. Куртева, Г.Д. Мотовилина, Е.В. Забавичева // Вопросы материаловедения. — 2022. — № 4 (112). — С. 174 — 181.
3. Счастливцев В.М. Особенности структуры бейнита в низкоуглеродистых свариваемых сталях после термомеханической обработки / В.М. Счастливцев, Т.И. Табачикова, И.Л. Яковлева, А.А. Круглова и др. // Вопросы материаловедения. — 2009. — № 3 (59). — С. 26 — 38.
4. Счастливцев В.М. Влияние термомеханической обработки на структуру и механические свойства стали типа 10ХН2М / В.М. Счастливцев, Т.И. Табачикова, И.Л. Яковлева, Л.Ю. Егорова и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. — 2006. — № 4. — С. 78 — 82.
5. Мишурина Е.В. Влияние температуры отпуска на структуру и свойства бейнитно-мартенситной стали после закалки / Е.В. Мишурина // Труды СПбГМТУ. — 2023. — № 1 (5). — С. 6 — 18.
6. Мотовилина Г.Д. Влияние структуры на величину равномерного удлинения штрипсовой стали / Г.Д. Мотовилина, В.В. Рябов, Е.И. Хлусова // Металлург. — 2011. — № 9. — С. 70 — 74.
7. Казаков А.А. Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей / А.А. Казаков, Н.В. Малахов, Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова // Вопросы материаловедения. — 2009. — № 3 (59). — С. 52 — 64.
8. Кудря А.В. Роль разномасштабных структур в обеспечении пластичности и вязкости структурно-неоднородных сталей / А.В. Кудря // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2005. — № 5. — С. 18 — 24.

REFERENCES

1. Khlusova E.I., Golosienko S.A., Motovilina G.D., Pasilova U.A. Vliyanie legirovaniya na strukturu i svoystva vysokoprochnoi khladostoi stali posle termicheskoi i termomekhanicheskoi obrabotki. [Influence of alloying on structure and properties of high-strength cold-resistant steel after heat and thermomechanical treatment]. *Voprosy Materialovedeniya [Topics in the Study of Materials Science]*. 2007. No. 1 (49). P. 20 — 32.
2. Kurteva K.J., Motovilina G.D., Zabavicheva E.V. Izmenenie struktury i svoystv po secheniyu tolstolistovogo prokata beinitno-martensitnoi stali [Changes in the structure and properties of the thick sheets of bainitic/martensitic steel at a cross-section]. *Voprosy Materialovedeniya [Topics in the Study of Materials Science]*. 2022. No. 4 (112). P. 174 — 181.
3. Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Kruglova A.A. et al. Osobennosti struktury beinita v nizkouglerodistykh svarivaemykh stalyakh posle termomekhanicheskoi obrabotki [Characteristic features of bainite structure of low-carbon welded steels after the thermomechanical treatment]. *Voprosy Materialovedeniya [Topics in the Study of Materials Science]*. 2009. No. 3 (59). P. 26 — 38.
4. Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., Egorova L.J. et al. Vliyanie termomekhanicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoystva stali tipa 10KhN2M [Thermomechanical treatment influence on structure and mechanical properties of 10XH2M grade steel]. *Vestnik of Novos Magnitogorsk State Technical University*. 2006. No. 4. P. 78 — 82.
5. Mishurinskaja E.V. Effect of tempering on the structure and properties of bainitic-martensitic steel after hardening]. *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University*. 2023. No. 1 (5). P. 6 — 18. (In Russ.)
6. Motovilina G.D., Ryabov V.V., Khlusova E.I. Vliyanie struktury na velichinu ravnomernogo udlineniya shtripsovoi stali [Effect of structure on value uniform elongation]. *Metallurg*. 2011. No. 9. P. 70 — 74.
7. Kazakov A.A., Malahov N.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I. Strukturnaya neodnorodnost' i metody ee snizheniya dlya povysheniya kachestva konstruktsionnykh staley [Structural heterogeneity and method of its reduction for improvement of quality of structural steels]. *Voprosy Materialovedeniya [Topics in the Study of Materials Science]*. 2009. No. 3 (59). P. 52 — 64.
8. Kudrya A.V. The role of structures of different size in plasticity and toughness of structurally inhomogeneous steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 2005. No. 5. P. 18 — 24. (In Russ.)