



(19)-0389-1

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАГРЕВАХ

В. И. Алимов¹, А. П. Штырно², Ю. С. Колчина

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,

58, ул. Артема, г. Донецк, ДНР, 83001.

E-mail: ¹alim41@mail.ru, ²shtixno@mail.ru

Получена 05 марта 2019; принята 22 марта 2019.

Анотация. В работе представлены результаты исследования влияния контролируемой прокатки и последующих технологических нагревов до различных температур, в том числе при сварке, и длительности выдержки при этом на процессы структурообразования в листовых сталях повышенной прочности EN36 и X70. Установлено, что при переделе толстого листа в изделия необходимо минимизировать температурно-временные параметры для предотвращения процессов разупрочнения. Сварка, как один из источников технологических нагревов, приводит к изменению структуры в зоне термического влияния и неравномерности распределения твердости по сечению сварных соединений, что снижает равнопрочность конструкции в целом. Кратковременный нагрев (порядка 15 мин) даже до температуры выше A_{c_1} (760 °C) и охлаждение на воздухе в зоне сварного шва не приводят к существенным изменениям структуры и твердости, но степень однородности свариваемых листов повышается.

Ключевые слова: листовая сталь, контролируемая прокатка, прочность, структурообразование, технологические нагревы, температура и длительность, разупрочнение.

ЗМІНА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ ПРИ НАСТУПНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАГРІВАХ

В. І. Алімов¹, А. П. Штирно², Ю. С. Колчина

ДОНУ ВПО «Донецький національний технічний університет»,

58, вул. Артема, м. Донецьк, ДНР, 83001.

E-mail: ¹alim41@mail.ru, ²shtixno@mail.ru

Отримана 05 березня 2019; прийнята 21 березня 2019.

Аннотация. У роботі представлені результати дослідження впливу контрольованої прокатки і наступних технологічних нагрівів до різних температур, у тому числі під час зварювання, і тривалості витримки при цьому на процеси структуроутворення в листових сталях підвищеної міцності EN36 і X70. Встановлено, що при переробці товстого листа у вироби необхідно мінімізувати температурно-часові параметри для запобігання процесів знеміцнення. Сварка, як одне з джерел технологічних нагрівів, призводить до зміни структури в зоні термічного впливу і нерівномірності розподілу твердості по перерізу зварних з'єднань, що знижує рівномірність конструкції в цілому. Короткочасний нагрів (близько 15 хв) навіть до температури вище від A_{c_1} (760 °C) і охолодження на повітрі в зоні зварного шва не призводять до істотних змін структури і твердості, але ступінь однорідності зварювальних листів підвищується.

Ключові слова: листова сталь, контрольована прокатка, міцність, структуроутворення, технологічні нагриви, температура і тривалість, знеміцнення.

CHANGES IN THE PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH SHEET STEEL IN SUBSEQUENT PROCESS HEATINGS

Valery Alimov¹, Alla Shtykhno², Yuliya Kolchina

Donetsk National Technical University,

58, Artem Str., Donetsk, DPR, 83001.

E-mail: ¹alim41@mail.ru, ²shtixno@mail.ru

Received 05 March 2019; accepted 22 March 2019.

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of controlled rolling and subsequent technological heating to various temperatures, including during welding, and the duration of exposure at the same time on the processes of structure formation in high-strength steel sheets EN36 and X70. It was found that when a thick sheet is redone into products, it is necessary to minimize temperature and time parameters in order to prevent softening processes. Welding, as one of the sources of technological heating, leads to a change in the structure in the heat-affected zone and uneven distribution of hardness over the cross section of welded joints, which reduces the equal strength of the structure as a whole. Short-term heating (about 15 minutes) even to a temperature above A_{c1} (760 °C) and cooling in air in the weld zone does not lead to significant changes in structure and hardness, but the degree of homogeneity of the sheets being welded increases.

Keywords: sheet steel, controlled rolling, strength, structure formation, process heating, temperature and duration, softening.

Введение

Качество листовой стали обусловлено многими факторами – химической и физической однородностью, минимальным содержанием вредных примесей и неметаллических включений, высоким качеством поверхности и плотностью металла в целом.

Неоднократно наблюдали, что после проведения контролируемой прокатки в отдельных участках листов формируется неоднородная структура, преимущественно с размером ферритного зерна в поперечнике 8...10 мкм, однако встречаются и более крупные зерна феррита с поперечником до 30 мкм. Кроме этого, по толщине листа часто наблюдается неоднородная кристаллографическая текстура и сильно выражена феррито-перлитная полосчатость. Неоднородность микроструктуры и кристаллографической текстуры в состоянии после контролируемой прокатки наследственно приводит к анизотропии, снижению ударной вязкости и сопротивлению металла хрупкому разрушению [1–10].

Основная часть

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей структурообразования в

листовых сталях повышенной прочности EN36 и X70 после контролируемой прокатки и при последующих технологических нагревах.

Для исследований использовали стали повышенной прочности EN36 и X70, относящиеся к мелкозернистым феррито-перлитным сталям. Химический состав исследуемых сталей приведен в таблице.

Микроструктура сталей EN36 и X70 после контролируемой прокатки (рисунок 1а и 1б соответственно) предстает собой преимущественно феррито-перлитную смесь с выраженной полосчатостью перлита, но наблюдаются также вытянутые вдоль направления прокатки зерна феррита, в которых процессы рекристаллизации пройти не успели. Основной причиной формирования полосчатой структуры с большой протяженностью полос феррита и перлита следует считать наследственное влияние деформированного нерекристаллизованного либо частично рекристаллизованного аустенита на его распад при переохлаждении ниже критических точек.

Известно, что чем выше суммарная степень деформации аустенита в области температур, в которых его рекристаллизация затруднена, либо существенно тормозится, и соответственно чем выше степень вытянутости его зерен в

Таблица. Химический состав исследуемых сталей, % масс.

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr+Ni+Cu	N	V	Ti	Nb	Mo	C _{экв}
ЕН36	0,11	0,21	1,18	< 0,005	< 0,014	0,08	0,003	0,25	0,015	0,04	0,05	< 0,37
X70	0,10	0,35	1,20	< 0,004	< 0,012	0,47	0,008	0,050	0,010	0,04	0,1	< 0,41

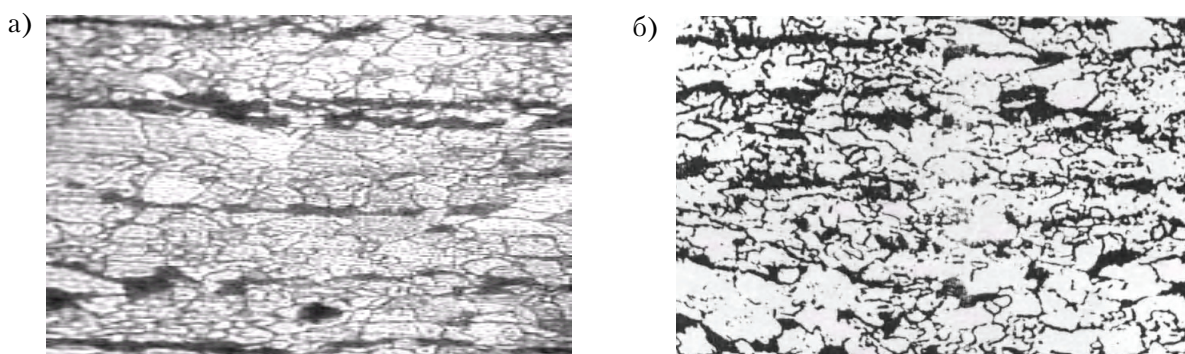


Рисунок 1. Микроструктура сталей после контролируемой прокатки, х 400: а – ЕН36; б – Х70.

направлении течения деформирования металла, тем более вытяженными будут вытянутые полосы перлита и феррита после завершения перлитного превращения.

Наличие перлитной полосчатости ведет к сильной анизотропии механических свойств. Вдоль нормали к плоскости листа пределы прочности, текучести и относительное удлинение почти в 2 раза ниже, чем в направлениях, лежащих в плоскости листа [5].

Для изучения влияния последующих технологических нагревов под термообработку на структуру и свойства листовой стали ЕН36 проводили нагрев образцов до температур 200, 400, 600, 750 и 900 °С с выдержкой 20 и 30 мин и дальнейшим охлаждением на воздухе. Микроструктуры после дополнительных нагревов приведены на рисунке 2.

При нагреве до 200 °С (рис. 2,а) происходит начальная стадия процесса старения, микроструктура и свойства практически не изменяются, но при этом выделяются карбиды, когерентно связанные с матрицей, перлитная полосчатость сохраняется, а твердость повышается до 124...130 НВ.

При нагреве до температуры 400 °С (рис. 2,б) наблюдаются существенные изменения в микроструктуре, заключающиеся в разрыве перлитной полосчатости, устранении наклепа после деформации; происходит снижение уровня остаточных напряжений и получается достаточно равномерно распределенная равноосная структура, обеспечивающая повышение твердости до 136...145 НВ.

При температуре 600 °С (рис. 2,в) происходит частичная рекристаллизация мартенсита, сопровождающейся измельчением ферритной составляющей; при таком нагреве формируется структура, в которой мелкие частицы цементита (перлита) равномерно распределены в ферритной матрице, при этом наблюдается максимальное увеличение твердости (до 150...155 НВ), что обусловлено равноосностью и дисперсностью структуры.

Нагрев и выдержка при температуре 750 °С (рис. 2,г) не приводит к значительным изменениям в микроструктуре, но можно наблюдать начальные процессы деления перлитных полосок, что в свою очередь несколько повышает твердость от 118...123 НВ до 125...130 НВ.

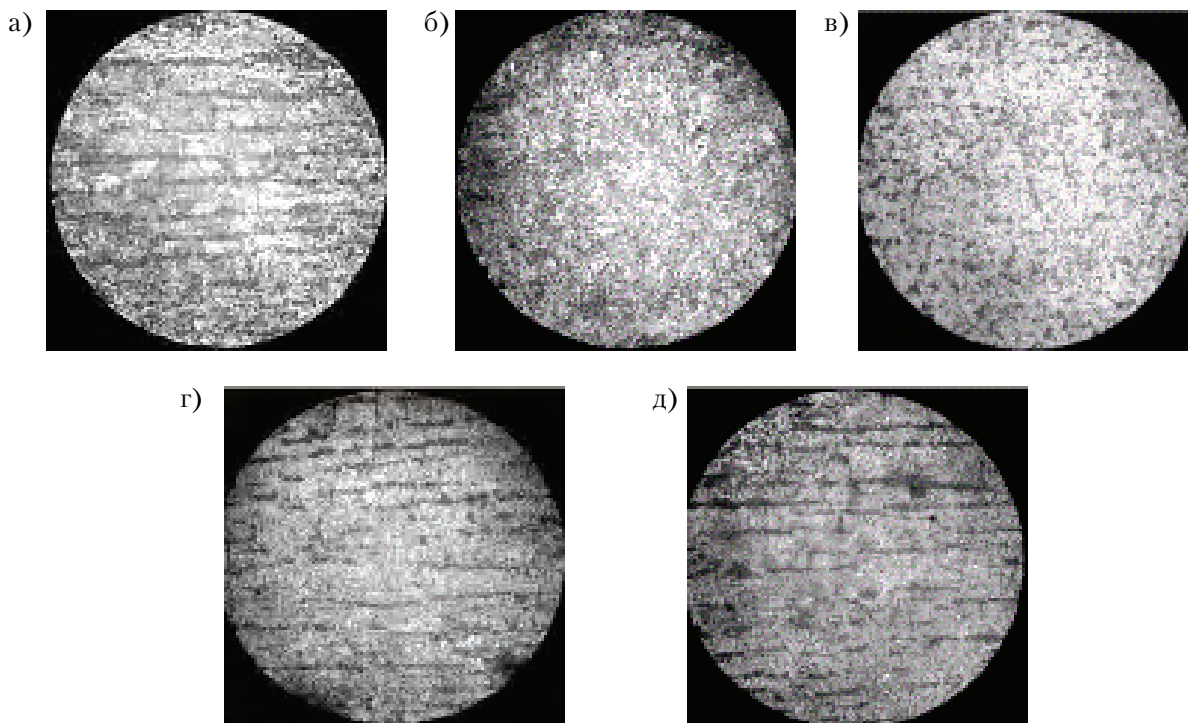


Рисунок 2. Микроструктуры стали EN36 после дополнительных нагревов до температур, $\times 400$: а – 200 °С, 2 часа; б – 400 °С, 1 час; в – 600 °С, 30 минут; г – 750 °С, 20 минут; д – 900 °С, 15 минут.

Нагрев до 950 °С (рис. 2,д) приводит к проявлению влияния дендритной неоднородности и ликвации, что значительно отражается на механических свойствах, и твёрдость снижается до 110–115 НВ.

Из гистограммы (рис. 3) видно, что дополнительные нагревы до 200, 400, 600, 750, 900 °С с последующим охлаждением на воздухе приводят к немономонному изменению твёрдости. Ее повышение при нагреве до 600 °С может быть обусловлено старением и частичной рекристаллизацией, сопровождающейся измельчением ферритной составляющей. Анализ изменения микроструктур при дополнительных нагревах показал важную роль структурообразования при последующих процессах сварки различных металлоконструкций из сталей данного типа.

Изучение влияния кратковременных нагревов при сварке на изменения структуры и твердости по сечению сварного шва производили на образцах листовых сталей X70 и EN36, подвергнутых автоматической сварке под флюсом и полуавтоматической сварке соответственно.

На рисунке 4 приведена макроструктура образца из стали X70 после двусторонней автоматической сварки под флюсом.

Из анализа макро- и микроструктуры исследуемых образцов можно видеть, что независимо от вида сварки закономерность воздействия градиента температур в них аналогична. В сварных соединениях четко различимы 3 зоны: зона сплавления, зона термического влияния и зона свариваемого металла, что характерно для типовых сварных соединений [11–15]. Особого внимания заслуживает зона термического влияния, в которой металл подвергается своеобразному термическому воздействию. При удалении от зоны сплавления к основному металлу структура металла изменяется соответственно термическим циклам нагрева и охлаждения и зависит от химического состава металла, предварительной термической и термомеханической обработки.

Микроструктура сварного шва листовой стали X70 представлена на рисунке 5 из которого видно, что микроструктура наплавленного металла и зоны сплавления (рисунок 5 а,б) состоит из продуктов промежуточного

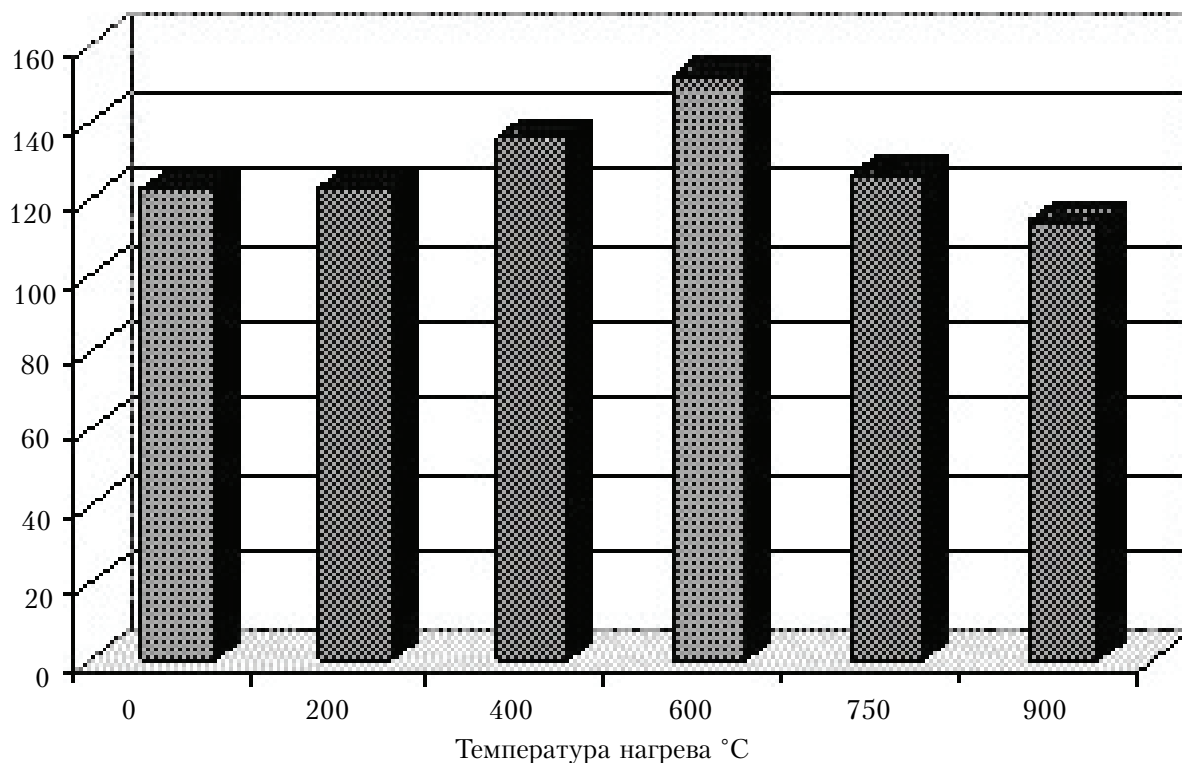


Рисунок 3. Твердость листовой стали EN36 после дополнительных нагревов.



Рисунок 4. Макротемплет исследуемых образцов.

распада аустенита и феррита в виде тонких прослоек по границам кристаллов. В зоне сплавления (рисунок 5 б) также видна структура мартенсита и бейнита. В этой зоне происходит быстрый рост зерен аустенита за счет нагрева до высокой температуры (1 100...1 150 °C).

В зоне термического влияния наблюдается изменение микроструктуры от мартенсито-бейнитной до феррито-перлитной, которые соответствуют процессам нормализации, неполной перекристаллизации и полной перекристаллизации при термообработке со

специального нагрева, т. е. перлитная полосчатость в этой зоне практически исчезает. Мелкое зерно в зоне полной перекристаллизации объясняется высокой скоростью охлаждения от температуры перекристаллизации и химическим составом стали X70.

На рисунке 6 представлено распределение твердости по сечению сварных образцов из сталей X70 и ЕН36. Наибольшая твердость наблю-

дается в центральной зоне сварного шва. Понижение твердости соответствует зоне перегрева и участкам неполной перекристаллизации.

Такое неравномерное распределение структуры и свойств по сечению сварных соединений может способствовать концентрации высоких термических напряжений и повысить риск образования трещин и разрушения конструкции в целом.

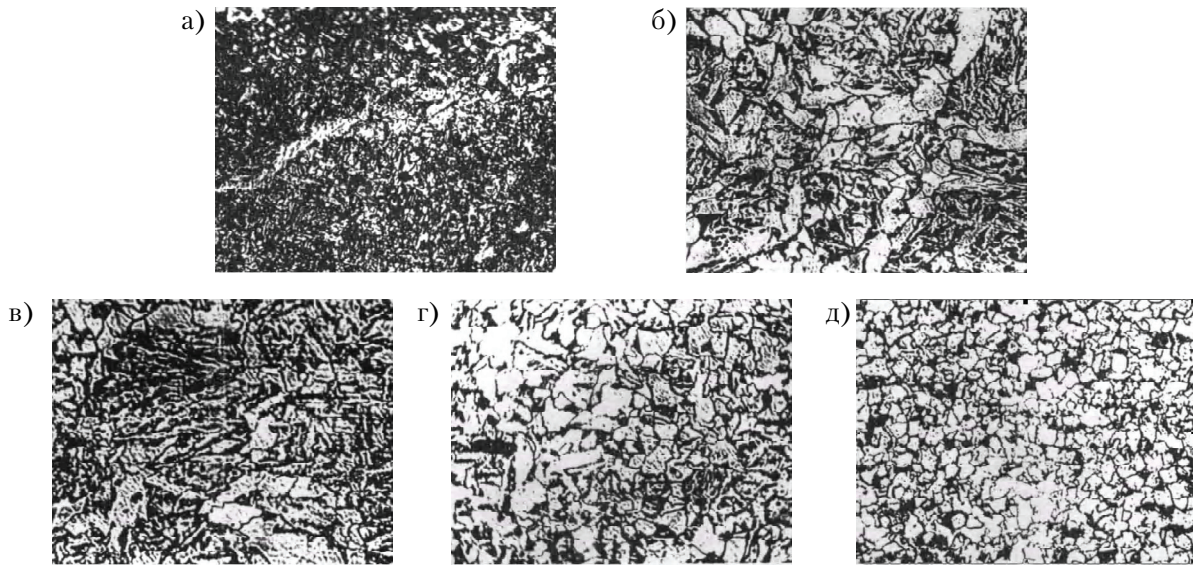


Рисунок 5. Микроструктура сварного шва стали X70, x 500: а – наплавленный металл; б – зона сплавления; в, г, д – зона термического влияния.

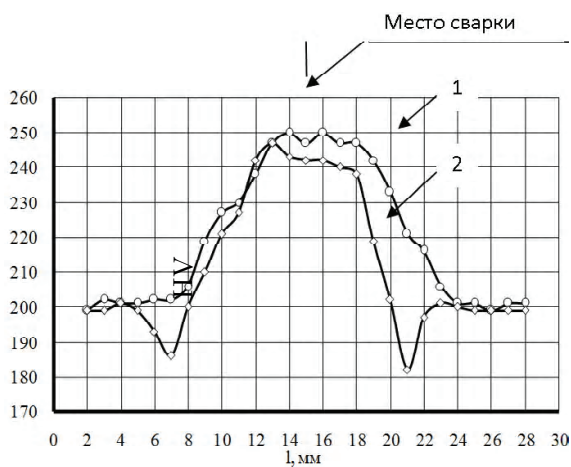


Рисунок 6. Распределение твердости по сечению сварного соединения образцов: 1 – сталь X70; 2 – сталь ЕН36.

Заключение

1. Микроструктура сталей ЕН36 и X70 в состоянии после контролируемой прокатки представляет собой преимущественно феррито-перлитную смесь (92 %Ф, 8 %П) с выраженной полосчатостью перлита и вытянутыми вдоль направления прокатки зернами феррита, в которых процессы рекристаллизации пройти не успели.
2. Наличие перлитной полосчатости может приводить к анизотропии механических свойств. Вдоль нормали к плоскости листа пределы прочности, текучести и относительное удлинение почти в 2 раза ниже, чем в направлениях, лежащих в плоскости листа; возможно устранение этого недостатка структуры стали ЕН36 после

- контролируемой прокатки путём проведения дополнительной термообработки.
3. Дополнительные нагревы до 200, 400, 600, 750, 900 °С с последующим охлаждением на воздухе приводят к немоноотонному изменению твёрдости.
 4. Образование в осевой зоне сильно развитой дендритной неоднородности и ликвации может быть связано с тем, что именно в ней имеется наибольшая концентрация неметаллических включений; эта зона наиболее

обогащена С, Мп, Si и т. д., что и вызывает такие изменения в исходной структуре.

5. Сварка, как один из видов технологических нагревов, приводит к изменению структуры в зоне термического влияния и неравномерности распределения твердости по сечению сварных образцов. Наибольшую твердость имеет зона наплавленного металла; такое изменение свойств в сварном шве может повысить риск образования трещин и разрушения конструкции в целом.

Литература

1. Пильгук, В. Е. Низколегированные листовые стали : монография–справочник / В. Е. Пильгук, В. И. Алимов, С. В. Пильгук, С. Ю. Пасечник. – Харьков : ФЛП Панов А. Н., 2018. – 345 с.
2. Алимов, В. И. Наследственность в металлических сплавах и активизация процессов химико–термической обработки изделий / В. И. Алимов, М. В. Георгиаду // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении : Сб. научных трудов. – Луганск : ЛНУ им. В. Даля, 2018. – 140 с.
3. Панасенко, Ф. Л. Прокатка и термическая обработка толстых листов / Ф. Л. Панасенко. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 154 с.
4. Бровман, М. Я. Усовершенствованная технология прокатки толстых листов / М. Я. Бровман. – М. : Metallurgiya, 1969. – 387 с.
5. Степанов, Г. А. Механические свойства листового проката стали в направлении его толщины / Г. А. Степанов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2001. № 7. С. 39–40.
6. Эгиз, И. В. Кристаллографическая текстура как средство контроля технологии прокатки листовой низкоуглеродистой стали / И. В. Эгиз, В. Ф. Шамрай // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008. № 1. С. 33–36.
7. Пемов, И. Ф. Повышение механических свойств толстолистового проката в направлении толщины / И. Ф. Пемов, О. В. Носоченко // *Металлург*. 2003. № 11. С. 49–52.
8. Смагоринский, М. Е. Повышение прочности толстолистового проката из низколегированных сталей / М. Е. Смагоринский, С. В. Кудряшов // *Сталь*. 1990. № 12. С. 74–76.
9. Патент № 18656, МПК С21Д 8/00, С21Д 1/02 Спосіб виробництва товстих листів / Алимов В. І., Егоров Н. Т., Кривов В. Н., Калугина Т. А.; заявник та власник патенту Донецький національний технічний університет, – № 200605580 ; заявл. 22.05.2006 ; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11. – 2 с.

Reference

1. Pilguk, V. Ye. Low-alloyed sheet steel: a monograph reference book / V. E. Pilguk, V. I. Alimov, S. V. Pilguk, S. Yu. Pasechnik. – Kharkov : FLP Panov A. N., 2018. – 345 p. (in Russian)
2. Alimov, V. I. Heredity in metal alloys and activization of the processes of chemical–thermal treatment of products / V. I. Alimov, M. V. Georgiadu // In : *Resource-saving technologies of production and processing by pressure of materials in mechanical engineering* : coll. of scientific papers. – Lugansk : LNU them W. Dahl, 2018. – 140 p. (in Russian)
3. Panasenko, F. L. Rolling and heat treatment of thick sheets / F. L. Panasenko. – M. : Metallurgizdat, 1959. – 154 p. (in Russian)
4. Brovman, M. Ya. Improved technology of rolling thick sheets / M. Ya. Brovman. – M. : Metallurgy, 1969. – 387 p. (in Russian)
5. Stepanov, A. A. Mechanical properties of rolled steel in the direction of its thickness / G. A. Stepanov // In : *Metallurgy and heat treatment of metals*. 2001. № 7. P. 39–40. (in Russian)
6. Egiz, I. V. Crystallographic texture as a means of controlling the technology of rolling low carbon steel sheet / I. V. Egiz, V. F. Shamray // In : *Metallurgy and heat treatment of metals*. 2008. № 1. P. 33–36.
7. Pemov, I. F. Increasing the mechanical properties of thick plates in the direction of thickness / I. F. Pemov, O. V. Nosochenko // In : *Metallurg*. 2003. № 11. P. 49–52. (in Russian)
8. Smagorinsky, M. Ye. Increasing the strength of rolled plates from low–alloyed steels / M. Ye. Smagorinsky, S. V. Kudryashov // In : *Steel*. 1990. № 12. P. 74–76. (in Russian)
9. Patent № 18656, МПК С21Д 8/00, С21Д 1/02 Method of production of thick sheets / Alimov V. I., Egorov N. T., Krymov V. N., Kalugina T. A. ; Applicant and patent holder Donetsk National Technical University. – № 200605580; stated. 22.05.2006; published by Nov 15, 2006, Bul. № 11. – 2 p. (in Ukrainian)

10. Мельник, С. Г. Снижение содержания неметаллических включений в стали для толстолистового проката / С. Г. Мельник // *Металлург*. 2003. № 8. С. 42–43.
11. Кирьян, В. И. Проблемы использования новых сталей повышенной и высокой прочности в сварных конструкциях / В. И. Кирьян, Л. И. Миходуй // *Автоматическая сварка*. 2002. № 3. С. 11–15.
12. Матросов, Ю. И. Высокачественная микролегированная ниобием H₂S-стойкая трубная сталь X65-70 / Ю. И. Матросов, А. О Носоченко, В. В. Володарский, В. П. Афанасьев, К. Хулка // *Сталь*. 2001. № 12. С. 55–58.
13. Grabin, V. F. Special features of structural transformations in welding : (Lectures for welding specialists) / V. F. Grabin. – Kiev : Naukova dumka, 1976. – 50 с.
14. Заславский, А. Я. Микролегирование стали для контролируемой горячей пластической деформации / А. Я. Заславский // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 8. С. 38–40.
15. Грынин, И. В. Принципы легирования, фазовые превращения, структура и свойства хладостойких свариваемых судостроительных сталей / И. В. Грынин, В. В. Рыбин, В. А. Малышевский, Е. И. Хлусова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. № 1. С. 9–15.
10. Melnik, S. G. Reducing the content of non-metallic inclusions in steel for plate rolling / S. G. Melnik // In : *Metallurg*. 2003. № 8. P. 42–43. (in Russian)
11. Kiryan, V. I. Problems of using new steels with increased and high strength in welded structures / V. I. Kiryan, L. I. Mikhoduy // In : *Automatic welding*. 2002. № 3. P. 11–15. (in Russian)
12. Matrosov, Yu. I. High-quality niobium micro-alloyed H₂S-resistant pipe steel X65–70 / Yu. I. Matrosov, A. O Nosochenko, V. V. Volodarsky, V. P. Afanasyev, K. Hulka // In : *Steel* . 2001. No. 12. P. 55–58. (in Russian)
13. Grabin, V. F. Special features of structural transformations in welding: (Lectures for welding specialists) / V. F. Grabin. – Kiev : Naukova dumka, 1976. – 50 p.
14. Zaslavsky, A. Ya. Micro-alloying of steel for controlled hot plastic deformation / A. Ya. Zaslavsky // In : *Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals*. 2010. № 8. P. 38–40. (in Russian)
15. Grynin, I. V. Principles of doping, phase transformations, structure and properties of cold-resistant weldable shipbuilding steels / I.V. Grynin, V. V. Rybin, V. A. Malyshevsky, E. I. Khlusova // In : *Metallurgical Science and Thermal metal processing*. 2007. № 1. P.9–15. (in Russian)

Алимов Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры физического материаловедения ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: разработка ресурсосберегающих технологий и оборудования для упрочняющей деформационно-термической обработки металлических изделий с использованием металлогенетической наследственности и различных способов формоизменения; разработка новых технологий и оборудования для упрочняющих обработок металлопроката, инструмента и деталей.

Штыхно Алла Петровна – доцент кафедры физического материаловедения ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: упрочняющая и разупрочняющая объемная и локальная термическая обработка металлоизделий и сварных соединений.

Колчина Юлия Сергеевна – магистр кафедры физического материаловедения ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: исследование влияния дополнительных нагревов на структуру и свойства листовой стали повышенной прочности, которая подвергалась контролируемой прокатке, с целью установления их параметров.

Алімов Валерій Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри фізичного матеріалознавства ДОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: розробка ресурсозберігаючих технологій і устаткування для зміцнюючої деформаційно-термічної обробки металевих виробів з використанням металогенетичної спадковості і різних способів формозміни; розробка нових технологій і обладнання для зміцнюючих обробок металлопрокату, інструменту та деталей.

Штихно Алла Петрівна – доцент кафедри фізичного матеріалознавства ДОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: зміцнювальна і розміцнювальна об'ємна і локальна термічна обробка металовиробів і зварних з'єднань.

Колчина Юлія Сергіївна – магістр кафедри фізичного матеріалознавства ДОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: дослідження впливу додаткових нагрівів на структуру і властивості листової сталі підвищеної міцності, яка піддавалася контрольованій прокатці, з метою встановлення їх параметрів.

Alimov Valeriy – D.Sc. in Technical Sciences, Professor Physical Materials Science Department, Donetsk National Technical University. Scientific interests: development of resource-saving technologies and equipment for hardening deformation-heat treatment of metal products using metal-genetic heredity and various forms of change; development of new technologies and equipment for hardening processing of metal, tools and parts.

Shtyhno Alla – Associate Professor Physical Materials Science Department, Donetsk National Technical University. Scientific interests: hardening and softening of the bulk and local heat treatment of hardware and welded joints.

Kolchina Julia – Master of Physical Materials Science Department, Donetsk National Technical University. Scientific interests: study of the effect of additional heating on the structure and properties of high-strength sheet steel, which was subjected to controlled rolling, in order to establish their parameters.