

УДК 539.4; 621.771.013

ВЛИЯНИЕ ПРОКАТКИ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ЭИ-961Ш

А. А. Фрик¹, М. А. Никитина², Р. К. Исламгалиев³

¹frikaleksandra@gmail.com, ²nik.marina.al@gmail.com, ³rinatis@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 23.04.2021

Аннотация. Исследовано влияние различных температурных режимов и степени деформации на структуру и прочностные свойства ферритно-мартенситной стали ЭИ-961Ш, подвергнутой прокатке и дополнительной перезакалке. В результате прокатки формируется бимодальная полосовая структура с распределением карбидных частиц $Cr_{23}C_6$ вдоль границ зерен. При применении дополнительной перезакалки сохраняется распределение карбидных частиц, сформированное при прокатке. Получено увеличение значения микротвердости на 34 % и предела временного сопротивления разрушению более чем на 50 % по сравнению со стандартной термической обработкой.

Ключевые слова: прокатка; сталь; структура; карбиды; деформация; термообработка; обжиг; микротвердость; прочность; пластичность.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при изменении температурного режима обработки, скорости и степени деформации протекающие процессы могут привести как к упрочнению, так и разупрочнению металлов. Холодная прокатка ($T_{пр} < 0,3 T_{пл}$) приводит к увеличению прочностных характеристик металла, таких как предел текучести, предел прочности и твердость, однако при этом с увеличением степени деформации происходит резкое снижение пластичности [1, 2]. В структуре металла наблюдаются значительные изменения: зерна вытягиваются в направлении обработки и вместе с изменением формы зерен происходит изменение пространственной ориентировки их кристаллической решетки.

Целью настоящей работы явилось установление закономерностей формирования структуры стали ЭИ-961Ш, подвергнутой прокатке и перезакалке, с определением режимов, обеспечивающих повышение прочностных свойств.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с поставленными задачами объектом исследований являлась ферритно-мартенситная сталь ЭИ-961Ш (табл. 1). Для стали ЭИ-961Ш стандартной термообработкой является закалка с температуры 1050 °С в масло и отпуск при 550–710 °С с последующим охлаждением на воздухе [3].

В качестве метода деформации была выбрана продольная прокатка. Из прутка стали ЭИ-961Ш после стандартной термообработки были подготовлены пластины размером 28×14,5×85 мм.

Таблица 1

Химический состав стали ЭИ-961Ш, ат.%

V	W	Si	Mn	Cu	Mo	Ni	S	C	P	Cr
0,18–0,30	1,6–2,0	до 0,6	до 0,6	до 0,3	0,35–0,5	1,5–1,8	до 0,025	0,10–0,16	до 0,03	10,5–12

Подготовленные образцы прокатывали в несколько проходов на лабораторном прокатном стане со скоростью вращения валков 1,5 м/мин с деформацией за проход 6 % на конечную толщину 4,3 мм. Для дальнейшего улучшения физико-механических свойств была применена постдеформационная термообработка выше температуры фазового превращения феррит/аустенит (850 °С) с последующей закалкой в масло (перезакалка).

Для изучения особенностей микроструктуры использовалась просвечивающая и растровая электронная микроскопия (РЭМ). Для определения механических свойств проводили испытания на растяжение и измерения микротвердости. Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497-84 на разрывной машине «Instron 3382» (максимальная нагрузка 10 т) при скорости растяжения 0,9 мм/мин (10^{-3} с^{-1}) на плоских образцах толщиной рабочей части 1 мм и длиной 5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения исходной структуры материала была проведена стандартная термическая обработка. Закалка привела к формированию структуры пакетного мартенсита, со средней толщиной пластин 518 ± 30 нм. Мартенсит характеризовался высокой плотностью дислокаций, которые наблюдались как в виде отдельных дислокаций, так и широких дислокационных стенок в пределах мартенситных пластин. В структуре мартенсита отсутствовали частицы вторичных фаз, характерные для исходного состояния (рис. 1, а).

Отпуск привел к более однородному распределению частиц вторичных фаз по объему (рис. 1, б). Частицы расположены в основном на границах зерен и вдоль границ бывших мартенситных пластин. Средний размер частиц составил 250 ± 30 нм, объемная доля частиц достигла 8,3 %. На фотографиях микроструктуры (рис. 1, б) видно, что морфология частиц разная. Более крупные, вытянутые частицы являются карбидами типа M_{23}C_6 , мелкие – частицы МХ.

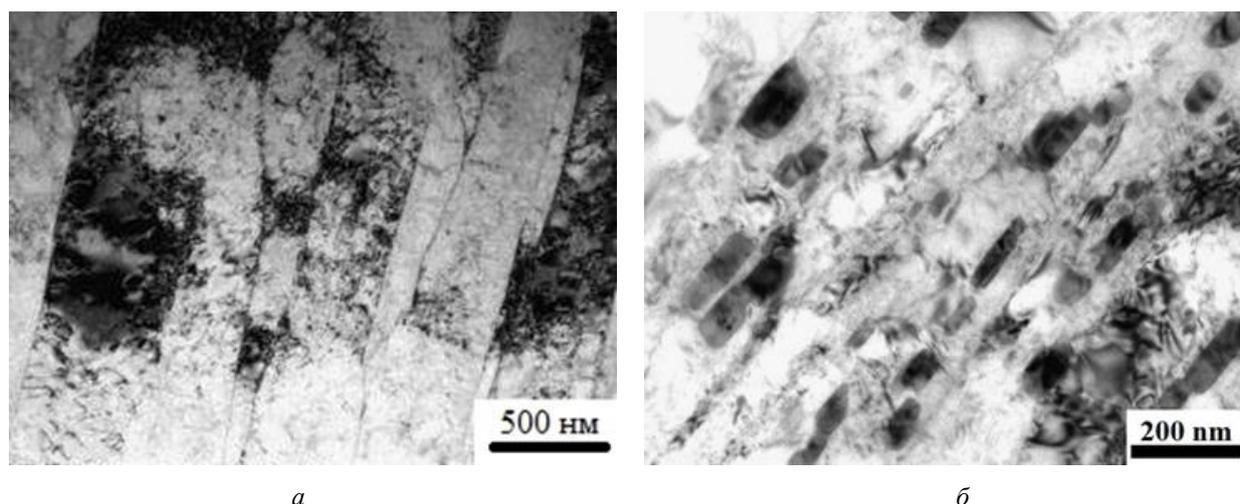


Рис. 1. Микроструктура стали ЭИ-961Ш после стандартной закалки (а) и отпуска (б)

ПЭМ исследования образцов после стандартной термической обработки (СТО) и перезаковки (ПЗ) показали увеличение плотности дислокаций в теле зерен и крупные карбидные частицы Cr_{23}C_6 размером 200 нм, расположенные преимущественно на границах зерен (рис. 2).

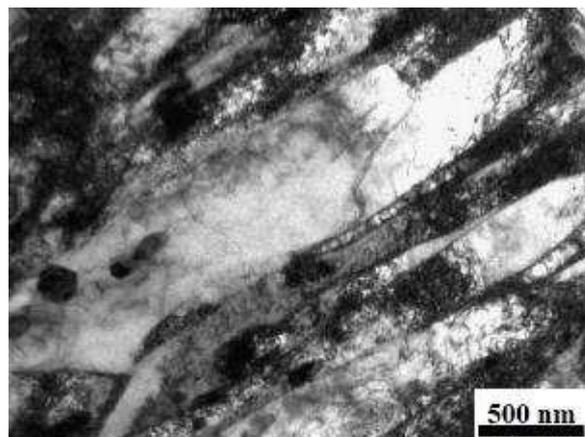


Рис. 2. Микроструктура ферритно-мартенситной стали после СТО и перезакалки с температуры 850 °С

Структура стали ЭИ-961Ш при обжатии до 30 % сохраняет исходные очертания бывших аустенитных зерен. Увеличение степени обжатия приводит к формированию полосовой структуры. При достижении 70 % формируется текстура по направлению прокатки. При этом происходит перераспределение грубых карбидов, которые выстраиваются цепочками вдоль границ зерен (рис. 3).

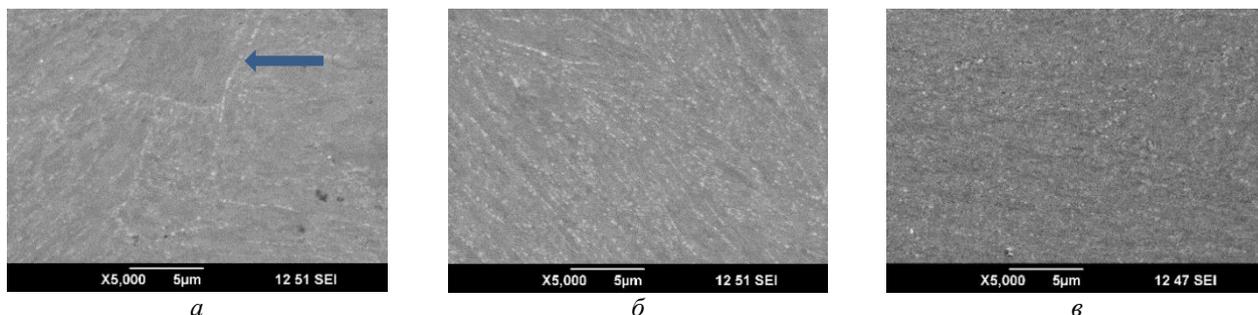


Рис. 3. Эволюция структуры стали ЭИ-961Ш при холодной деформации:
а – 30 %; б – 50 %; в – 70%. Стрелкой отмечено направление прокатки

ПЭМ фотографии тонкой структуры стали ЭИ-961Ш после холодной прокатки на 70 %, представленные на рис. 4, а, демонстрируют формирование полосовой структуры со средней шириной пластин 200 ± 20 нм. Анализ структуры после прокатки до деформации 70 % и перезакалки (рис. 4, б) показал, что формируется вытянутая пластинчатая структура, также в структуре присутствуют равноосные зерна размером $2 \pm 0,5$ мкм. Внутри микронных зерен наблюдаются пластины мартенсита, ширина которых колеблется от 20 до 250 нм. После холодной прокатки и перезакалки наблюдается увеличение доли глобулярных карбидов размером 200 ± 20 нм (рис. 4, б) по сравнению с состоянием после прокатки.

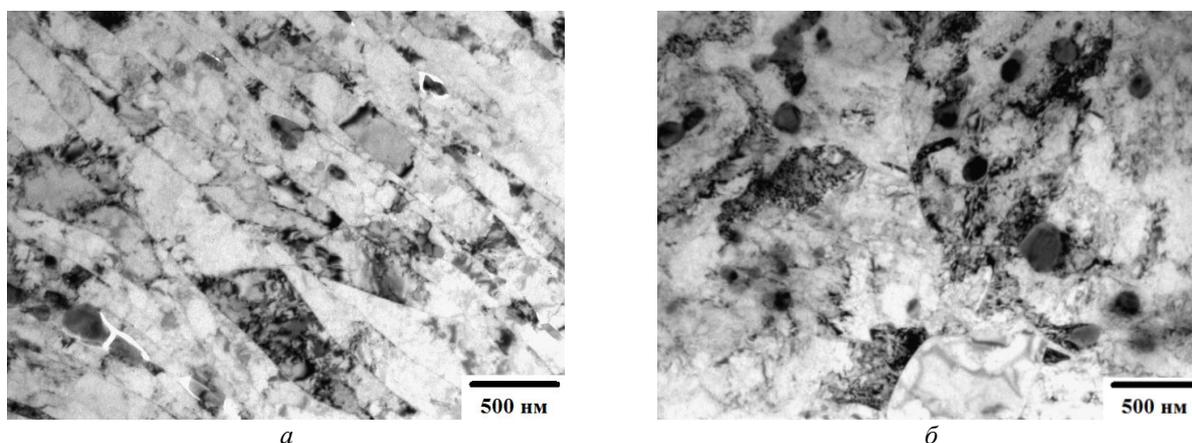


Рис. 4. Структура образцов, подвергнутых холодной прокатке:
а – прокатка до деформации 70 %; б – прокатка до деформации 70 % и дополнительная перезакалка

Очевидно, что перезакалка способствует значительному увеличению размеров частиц. Частицы уже перестают сдерживать движение границ зерен и приводят к формированию структуры с равноосной формой зерен.

Анализ тонкой структуры методом ПЭМ для стали ЭИ-961Ш после теплой прокатки на общую степень обжатия 70 % методом ПЭМ представлен на рис. 5. Субзерна со средней шириной 300 ± 40 нм вытянуты вдоль направления прокатки. По границам и тройным стыкам расположены карбиды преимущественно глобулярной формы. Средний размер карбидов составляет 150 ± 30 нм. Теплая прокатка приводит к более равномерному распределению карбидных частиц по объему стали ЭИ-961Ш. Размер карбидов при перезакалке (рис. 5, б) остается более стабильным и структура, сформированная после теплой прокатки и перезакалки термообработки, имеет более пластинчатую форму.

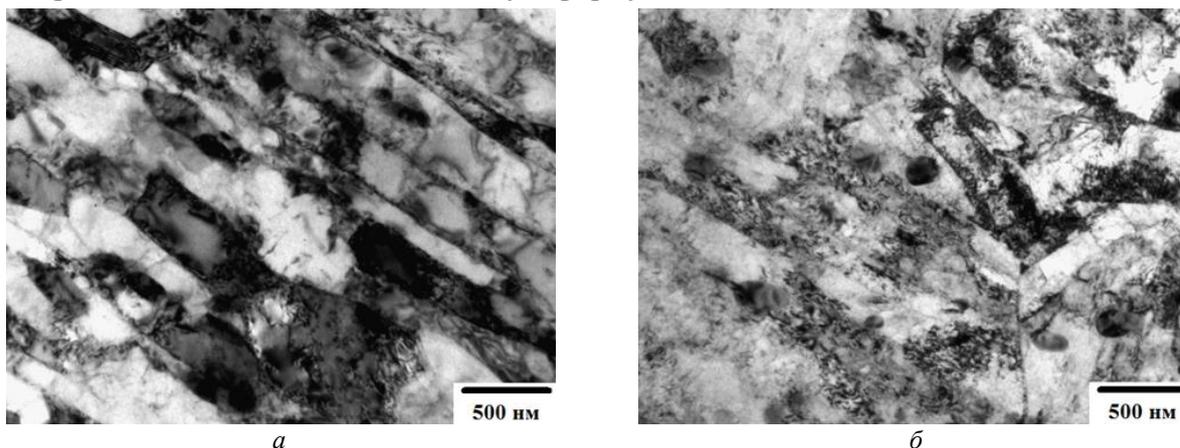


Рис. 5. Структура образцов, подвергнутых теплой прокатке:

а – прокатка до деформации 70 %; б – прокатка до деформации 70 % и дополнительная перезакалка

Сравнительный анализ структуры в РЭМ для образцов, подвергнутых ХП при 20 °С, ТП при 550 °С и перезакалке, представлен на рис. 6. Видно, что после прокатки и перезакалки в структуре стали после формируется равноосная структура для состояний с накопленной деформацией 30 и 50 %. Средний размер зерен уменьшается с повышением степени деформации: с 5 мкм для 30 % до 2 мкм для 50 %.

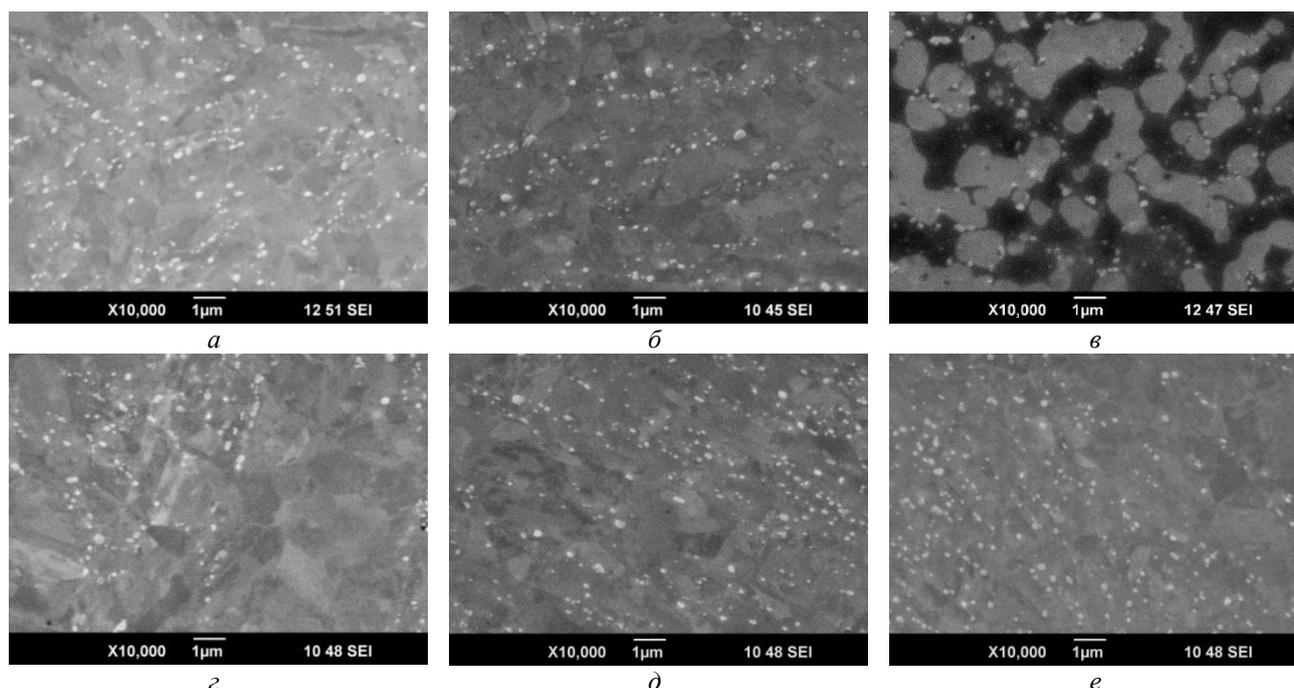


Рис. 6. Влияние перезакалки на структуру стали ЭИ-961Ш после холодной прокатки на:

а – 30 %; б – 50 %; в – 70 %; после теплой прокатки при 550 °С на: г – 30 %; д – 50 %; е – 70 %.

Изображение РЭМ во вторичных электронах

Крупные карбиды после перезакалки сохраняют свое распределение, сформированное при прокатке.

Усредненные значения микротвердости образцов стали после прокатки по различным режимам представлены на рис. 7.

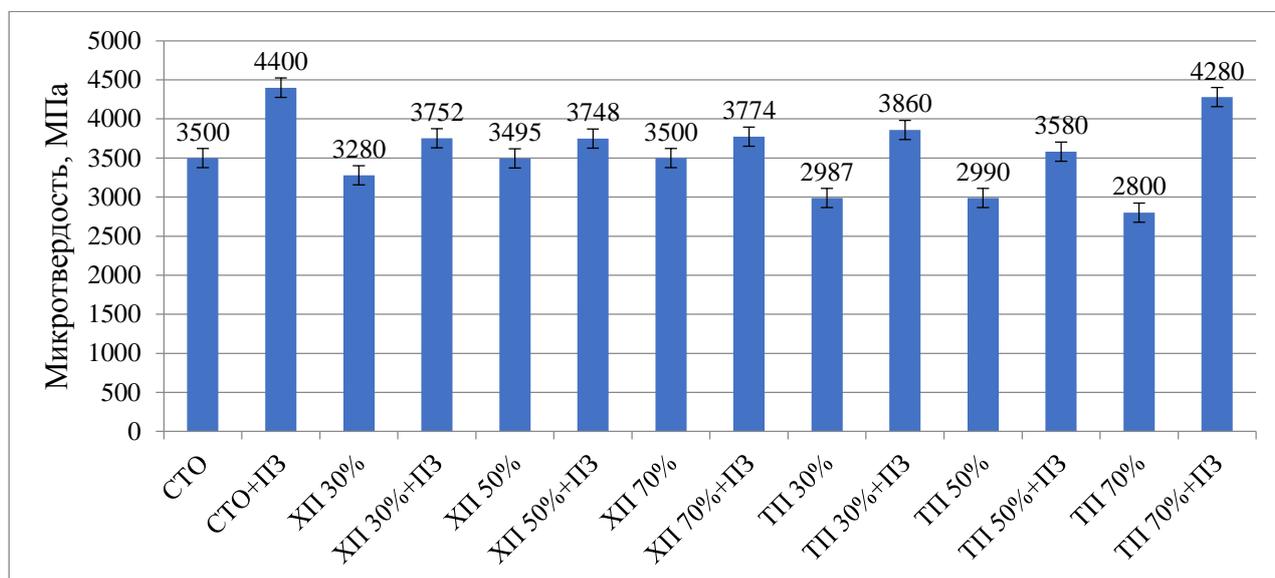


Рис. 7. Микротвердость стали ЭИ-961Ш после различных видов обработки

Микротвердость в исходном горячекатаном состоянии составила 3200 МПа, после закалки микротвердость увеличилась до 5100 МПа, а после отпуска она практически вернулась к исходному значению – 3500 МПа. Применение перезакалки после стандартной термической обработки привело к увеличению микротвердости до значения в 4400 МПа.

Холодная прокатка приводит к увеличению значений микротвердости. Так, применение холодной прокатки позволило увеличить микротвердость с 3200 МПа до 3500 МПа при степени деформации 70 %. При теплой прокатке наблюдается изменение значений микротвердости образцов в пределах погрешности, что очевидно, связано с процессами рекристаллизации, развитие которых увеличивается с увеличением степени деформации. Так, максимальное значение микротвердости при температуре деформации 550 °С наблюдается после деформации на 30 % – 3000 МПа.

Однако проведение последующей термической обработки в виде перезакалки с температуры фазового перехода феррит/аустенит приводит к увеличению значений микротвердости во всех состояниях. Так, микротвердость в образцах после холодной прокатки увеличилась до 3750 МПа (рис. 7). После теплой прокатки на 70 % и перезакалки микротвердость увеличилась до 4280 МПа (рис. 7).

Инженерные кривые растяжения ферритно-мартенситной стали после различных методов обработки представлены на рис. 8–10. После прокатки предел временного сопротивления разрушению и предел текучести возрастают несущественно по сравнению с СТО. Так, после холодной прокатки максимальное значение предела временного сопротивления демонстрируют образцы со степенью деформации 70 % – 1250 МПа при пластичности 11 %, и образцы после теплой прокатки тоже на 70 % – 1000 МПа, пластичность при этом составила 18 %.

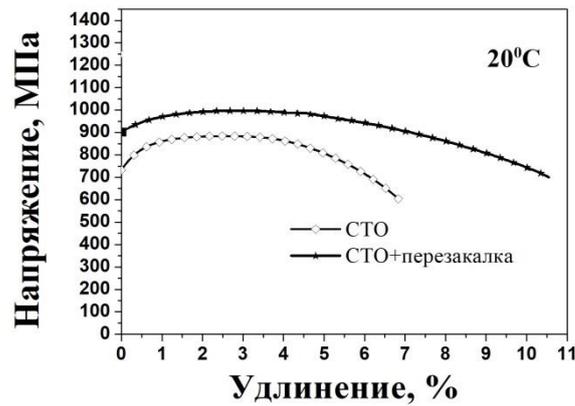


Рис. 8. Инженерные кривые растяжения ферритно-мартенситной стали после СТО

Применение дополнительной термообработки в виде перезакалки к образцам после прокатки оказывает влияние на механические характеристики в виде увеличения предела временного сопротивления разрушению и повышение пластичности, что сопоставимо с результатами, полученными при применении данной обработки на образцах после стандартной термической обработки.

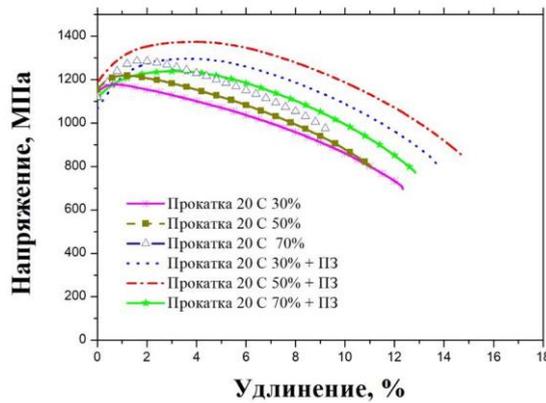


Рис. 9. Инженерные кривые растяжения ферритно-мартенситной стали после холодной прокатки

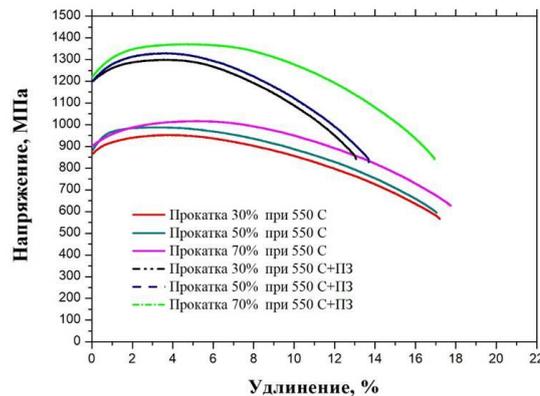


Рис. 10. Инженерные кривые растяжения ферритно-мартенситной стали после теплой прокатки

В результате проведения механических испытаний на растяжение установлено существенное влияние измельчения зеренной структуры и на предел временного сопротивления и предел текучести. Значения σ_B в образцах после холодной прокатки на 50 % и теплой прокатки на 70 % и дополнительной перезакалки достигают значений 1380 МПа, при пластичности 17 и 18 % соответственно (табл. 2).

Механические свойства стали после различных режимов прокатки

Состояние		σ_v , МПа	δ , %		σ_v , МПа	δ , %
СТО		870	7	+ ПЗ	980	11
Прокатка 20 °С	30 %	1170	16		1290	16
	50 %	1220	14		1380	17
	70 %	1250	11		1230	15
Прокатка 550 °С	30 %	950	21		1350	14
	50 %	960	21		1340	15
	70 %	1000	18		1380	18

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье было исследовано влияние различных температурных режимов и степени деформации на структуру и прочностные свойства ферритно-мартенситной стали ЭИ-961Ш, подвергнутой прокатке и перезакалке.

Использование теплой прокатки на 70 % и перезакалки привело к увеличению микротвердости образцов до 4280 МПа, что на 34 % выше, чем у образцов, подвергнутых СТО (3200 МПа).

Применение деформационной обработки в виде прокатки в сочетании с перезакалкой позволило увеличить предел временного сопротивления разрушению на 53 % до 1380 МПа, при сохранении пластичности на уровне 17 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахова Я. Э., Янушкевич Ж. Ч., Беляков А. Н. Влияние холодной прокатки на структуру и механические свойства аустенитной коррозионно-стойкой стали 10X18H8D3BP // *Металлы*. 2012. № 5. С. 38–45. [Ya. E. Shakhova, J. C. Yanushkevich, A. N. Belyakov, "Effect of cold rolling on the structure and mechanical properties of austenitic corrosion-resistant steel 10Kh18N8D3BR", (in Russian), in *Metally*, no. 5, pp. 38-45, 2012.]
2. Однoboкова М. В., Беляков А. Н. Влияние холодной прокатки и последующего отжига на микроструктуру и микротекстуру аустенитных коррозионно-стойких сталей // *Деформация и разрушение материалов*. 2018. № 9. С. 23–32. [M. V. Odnobokova, A. N. Belyakov, "Effect of cold rolling and subsequent annealing on the microstructure and the microtexture of austenitic corrosion-resistant steels", (in Russian), in *Deformaciya i razrushenie materialov*, no. 9, pp. 23-32, 2018.]
3. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304 / I. Altenberger, et al. // *Materials Science and Engineering: A*. 1999. Vol. 264, Iss. 1–2. Pp. 1-16. [I. Altenberger, et al., "Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304", in *Materials Science and Engineering: A*, vol. 264, Iss. 1-2, pp. 1-16, 1999.]

ОБ АВТОРАХ

ФРИК Александра Анатольевна, асп. каф. МиФМ. Дипл. магистр по спец. «Наноинженерия» (УГАТУ, 2020). Занимается изучением влияния различных видов обработок на структуру феррит-мартенситных сталей.

НИКИТИНА Марина Александровна, дипл. инж.-технолог (УГАТУ, 2005) по спец. «Реновация средств и объектов материального производства». Канд. техн наук по спец. «Нанотехнологии и наноматериалы». Мл. науч. сотр. НИИ ФПМ. Иссл. в обл. ультрамелкозернистых сталей и сплавов.

ИСЛАМГАЛИЕВ Ринат Кадыханович, проф. каф. МиФМ института АТМ УГАТУ. Физик, преп. (БГУ, 1980). Д-р физ.-мат. наук по спец. «Физика конденсированного состояния» (ИФМК, 1999). Иссл. ультрамелкозернистых материалов и их свойств, полученных методами интенсивной пластической деформацией.

METADATA

Title: The effect of rolling and additional heat treatment on the structure and strength properties of steel EI-961SH.

Authors: A. A. Frik¹, M. A. Nikitina², R. K. Islamgaliev³

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (USATU), Russia.

Email: ¹frikaleksandra@gmail.com, ²nik.marina.al@gmail.com, ³rinatis@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 3 (93), pp. 10-17, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In this paper, the influence of various temperature conditions and the degree of deformation on the structure and strength properties of ferritic-martensitic steel EI-961SH, subjected to rolling and additional heat treatment, is investigated. As a result of rolling, a bimodal band structure is formed with the distribution of $Sg_{23}C_6$ carbide particles along the grain boundaries. When applying additional heat treatment, the distribution of carbide particles formed during rolling is preserved. An increase in the microhardness value by 34 % and the limit of the temporary fracture resistance by more than 50 % compared to the standard heat treatment was obtained.

Key words: rolling; steel; structure; carbides; deformation; heat treatment; compression; micro-hardness; strength; ductility.

About authors:

FRIK, Aleksandra Anatoljevna, Post. Student, Dept. of Materials Sci. and Physic of Metals. Master of Nanoengineering (USATU, 2020).

NIKITINA, Marina Aleksandrovna, Dipl. Engineer (USATU, 2005) in "Renovation of the means and facilities of material production". Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2020). Junior Researcher at IPAM USATU. Research in the field of ultrafine-grained steels and alloys.

ISLAMGALIEV, Rinat Kadyhanovich, Prof. of Dept. of Material Sci. and Phys.of Metals of Ufa State Aviation Technical University. Physicist, lecturer (Bashkir State University, 1980). Dr. Degree in Physics and Mathematics in the specialty "Physics of Condensed Matter" (Institute of Physics of Molecules and Crystals, 1999). Research on ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation, and their properties.