

УДК 621.771

Влияние деформации на свойства плит из конструкционной низколегированной стали 09Г2С толщиной 130 мм при горячей прокатке на стане 5000

Ковтунов Станислав Владимирович^{1(*)}

kovtunov_sv@omk.ru

Мунтин Александр Вадимович²

muntin_av@bmstu.ru

Борисенко Никита Романович²

borisenkonikita17@yandex.ru

Колесников Александр Григорьевич²

agk@bmstu.ru

¹ АО «Объединенная металлургическая компания», Москва, Россия² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты оценки микроструктуры и свойств толстой плиты 130 мм из марки стали 09Г2С в состоянии после контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения. Выполнено компьютерное моделирование процесса горячей прокатки толстой плиты в программном комплексе для создания моделей на базе метода конечных элементов. В результате моделирования определено распределение температуры и полной эквивалентной пластической деформации по толщине раската в каждом проходе. Представлено заключение о взаимосвязи температурно-деформационных условий, микроструктуры и свойств плит по толщине.

Ключевые слова: толстолистовой прокат, горячая прокатка, конструкционная низколегированная сталь 09Г2С, механические свойства, микроструктура, метод конечных элементов, полная эквивалентная пластическая деформация

The effect of deformation on the properties of structural low-alloy steel 09G2S plates with a thickness of 130 mm during hot rolling on the mill 5000

Kovtunov Stanislav Vladimirovich^{1(*)}

kovtunov_sv@omk.ru

Muntin Aleksandr Vadimovich²

muntin_av@bmstu.ru

Borisenko Nikita Romanovich²

borisenkonikita17@yandex.ru

Kolesnikov Aleksandr Grigorievich²

agk@bmstu.ru

¹ JSC United Metallurgical Company, Moscow, Russia² BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The results of the evaluation of the microstructure and properties of a 130 mm thick plate of steel grade 09G2C in a state after controlled rolling and accelerated cooling are presented. A computer modeling of the thick plate hot rolling process in a software package for creating models based on the finite elements method has been performed. As a result of the modeling, the distribution of temperature and total equivalent plastic strain across the thickness of the rolled product in each pass are determined. A conclusion is presented on the relationship between temperature and deformation conditions, the microstructure and properties of the plates thickness.

Keywords: thick plate, hot rolling, structural low-alloy steel 09G2S, mechanical properties, microstructure, finite elements method, total equivalent plastic strain

Введение. Листовой прокат из конструкционной низколегированной стали 09Г2С широко используется в нашей стране в качестве материала для изготовления изделий машиностроения. Потребители листового проката толщиной свыше 100 мм постоянно ужесточают требования к равномерности механических свойств по толщине.

На прокатном стане 5000 имеется существенный потенциал для успешного производства толстых плит ввиду наличия современного оборудования с высоким уровнем автоматизации, а также газовой камерной печи с выкатным подом для проведения термической обработки продукции. Ввиду постоянно растущих требований необходимо обеспечивать высокий уровень механических свойств, в том числе хладостойкость при температурах до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ по всей толщине. В связи с этим, актуальным является исследование распределения термомеханических режимов обработки и их влияния на конечную структуру в разных слоях по толщине.

Материалы и методы. В качестве материала для исследований использована низколегированная конструкционная марка стали 09Г2С, химический состав приведен в таблице.

Химический состав слэбов стали марки 09Г2С

Марка стали	Химический состав, %										Ac1, $^{\circ}\text{C}$	Ac3, $^{\circ}\text{C}$
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Al	Nb	Ti	P	S		
09Г2С	0,097	0,63	1,58	0,02	0,01	0,039	0,027	0,019	0,008	0,002	714	872

Металлографическое исследование структуры после химического травления шлифов в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты проводилось при помощи инвертированного металлографического микроскопа «Leica DMi8». Твердость измеряли по методу Виккерса при нагрузке 1 кг с использованием автоматического микротвердомера KB-30. Динамические испытания на ударный изгиб образцов Шарпи, отобранных в поперечном направлении, выполняли по ГОСТ 9454 на копре Zwick/Roell.

Для теоретического исследования закономерностей распределения температуры и деформации по сечению проката использовался программный комплекс на базе решателя MSC Marc. Конечно-элементное моделирование является эффективным инструментом создания надежных и точных математических моделей для решения деформационных и тепловых задач процесса горячей прокатки [1, 2].

Валидация модели производилась на основании полученных промышленных технологических данных при производстве листового проката толщиной 130 мм.

Результаты. Прокатка плит толщиной 130 мм марки стали 09Г2С осуществлялась в 3 стадии, включая 6 проходов в черновой стадии, 4 прохода в промежуточной стадии и 4 прохода в чистовой стадии. После прокатки плиты подвергались ускоренному охлаждению. На рис. 1 приведен вид микрострук-

туры листового проката по толщине и распределение твердости по толщине плиты.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования процесса прокатки плиты марки стали 09Г2С толщиной 130 мм, показана величина полной (линейная и сдвиговая составляющие) эквивалентной пластической деформации и температуры по толщине в каждом проходе.

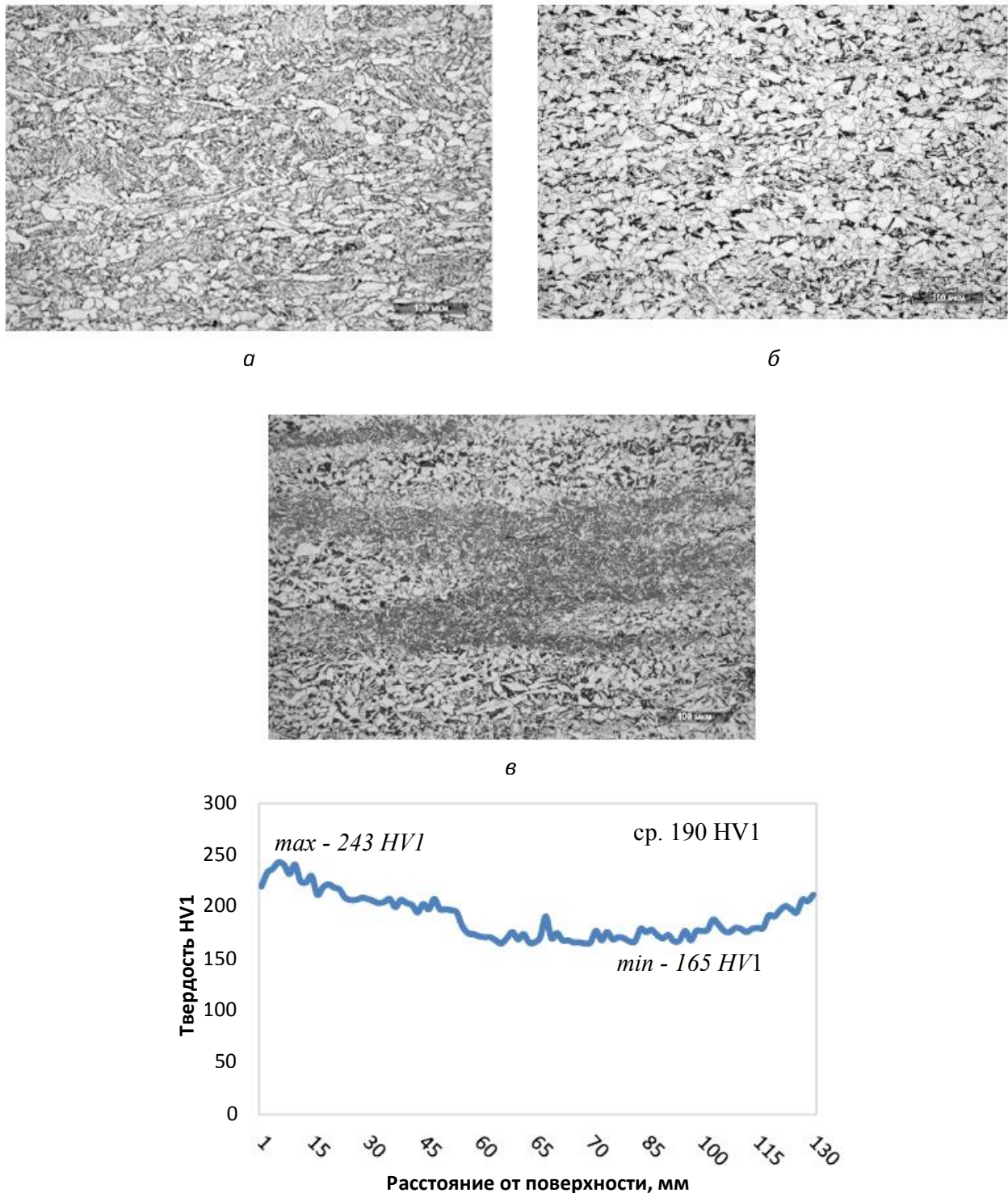


Рис. 1. Вид микроструктуры и твердость плиты 130 мм по толщине:

а — поверхность, б — 1/4 толщины, в — 1/2 толщины

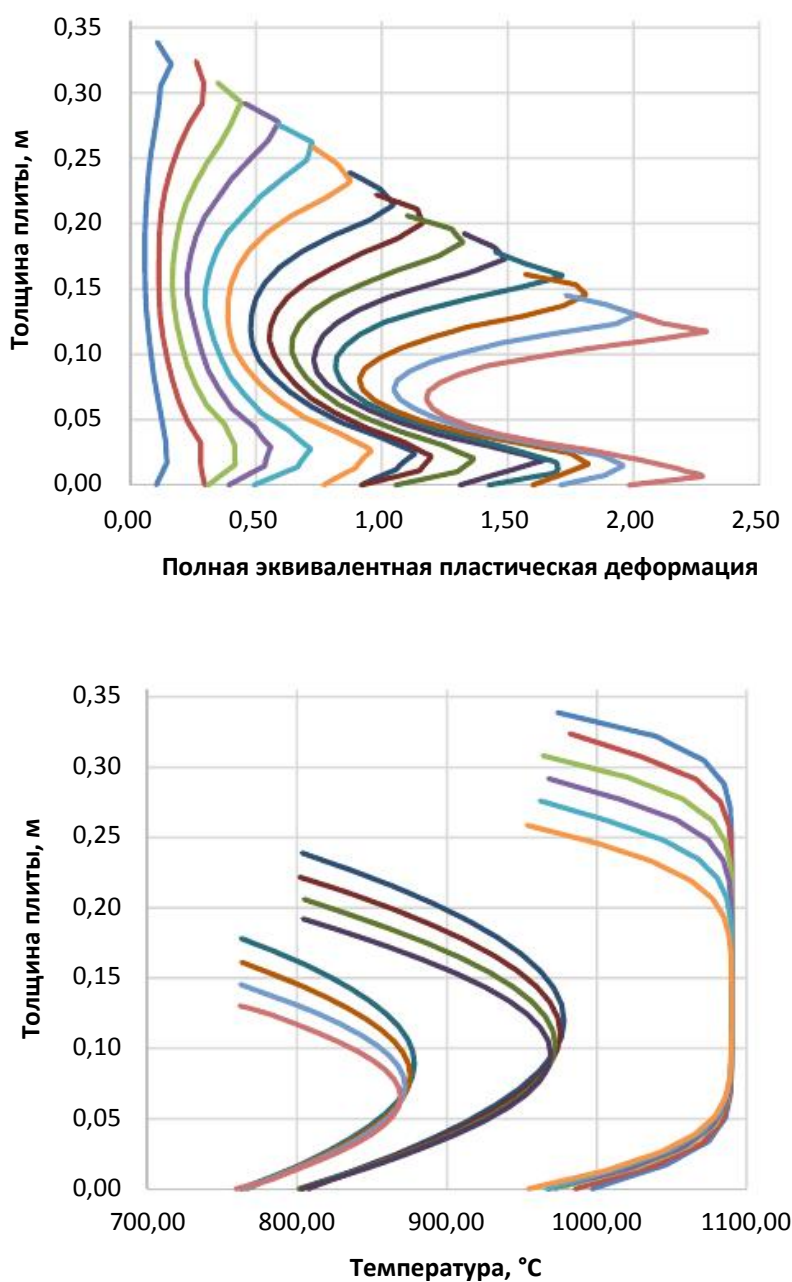


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования прокатки плиты 130 мм марки стали 09Г2С

Обсуждение. Как известно, эффективным способом достижения требуемых свойств проката является термомеханическая обработка, включающая несколько стадий прокатки [3]. Однако при прокатке толстых плит в различных слоях заготовки формируются разные температурно-деформационные условия.

В результате прокатки плит толщиной 130 мм марки стали 09Г2С и последующего ускоренного охлаждения сформировалась неоднородная по толщине микроструктура, что связано с неравномерным распределением температурно-деформационных условий при прокатке. В поверхностных слоях металла наблюдаются крупные вытянутые вдоль линии прокатки бывшие

аустенитные зерна со структурой бейнита и небольшим содержанием феррита. По мере удаления от поверхности проката наблюдается увеличение доли феррита и появление перлита, в середине проката по толщине выявлены бейнитные участки ввиду изначальной ликвационной неоднородности непрерывнолитого сляба. Неравномерность микроструктуры также подтверждает различная твердость металла по толщине. Проблема по разработке оптимальных режимов термомеханической обработки проката для достижения равномерной микроструктуры плит актуальна, проведен ряд исследований [4–8].

Результаты исследования распределения температуры заготовки в процессе черновой стадии прокатки говорят о том, что в середине заготовки температура металла не снижается и примерно равняется температуре нагрева слябов перед прокаткой. Причем температура является равной на расстоянии примерно $1/4$ толщины от середины заготовки. Далее после межстадийной паузы разница температуры между серединой заготовки и поверхностью увеличилась и составляла порядка $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. После паузы и подстуживания заготовки до $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ перед чистовой стадией прокатки градиент температур снизился до $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стоит отметить, что при подобном распределении температур в каждом слое заготовки протекали различные режимы термомеханической обработки.

Ранее подробно описан характер и причины распределения накопленной пластической деформации по толщине сляба при использовании симметричной компьютерной модели прокатки на толстолистовом стане [9, 10]. Стоит отметить, что при первых проходах неравномерность деформации заготовки незначительна. Однако суммарный вклад неравномерности деформации в каждом последующих проходах приводит к существенному различию накопленной пластической деформации по толщине. Максимальная деформация плиты 130 мм наблюдается в $1/8$ по толщине проката и почти вдвое превышает подобную деформацию в середине плиты. Результаты компьютерного моделирования процесса прокатки плиты 130 мм подтверждают актуальность проблемы неравномерной эквивалентной деформации плиты по толщине, что приводит к существенному отличию микроструктуры [11].

Заключение. При прокатке толстых плит наблюдается существенная неравномерность температурного профиля и распределения полной эквивалентной пластической деформации по толщине проката. Полная эквивалентная пластическая деформация, за счет неравномерности распределения сдвиговой составляющей, имеет максимальные значения в $1/8$ по толщине проката и минимальные значения в $1/2$ толщины проката. Данные факторы приводят к формированию неравномерной микроструктуры и свойств по толщине.

Разработана компьютерная модель процесса прокатки толстых плит на стане 5000. Модель может быть использована для разработки оптимальных температурно-деформационных режимов деформации, которые позволят добиться снижения неравномерности микроструктуры и свойств плит по толщине.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Zinyagin A.G., Borisenko N.R., Muntin A.V., Kruchkova M.O. Features of finite element modeling for hot rolling process of clad sheets and strips. *CIS Iron and Steel Review*, 2023, vol. 26, pp. 51–57. <https://doi.org/10.17580/cisr.2023.02.08>
- [2] Zinyagin A.G., Borisenko N.R., Stepanov A.P., Kruchkova M.O. Development of measures to reduce longitudinal bending of thick clad and alloyed steel plates during hot rolling. *CIS Iron and Steel Review*, 2025, vol. 29, pp. 56–60. <https://doi.org/10.17580/cisr.2025.01.10>
- [3] Бернштейн М.П. *Термомеханическая обработка металлов и сплавов*. Москва, Металлургия, 1968, 596 с.
- [4] Кравченко А.Г., Багмет О.А., Эфрон Л.И., Астафьев Д.С. Разработка технологии производства плит из непрерывнолитых слэбов низкоуглеродистых микролегированных сталей с применением термомеханической обработки. *Черные металлы*, 2024, № 12, с. 50–60.
- [5] Голи-Оглу Е.А., Бокачев Ю.А. Термомеханическая обработка плит толщиной до 100 мм из низколегированной конструкционной стали в NLMK Dansteel. *Сталь*, 2014, № 9, с. 71–78.
- [6] Wang X., Zhang Z., Zhang P. Development and Technology of Large Thickness TMCP Steel Plate with 390MPa Grade Used for Engineering Machinery. *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels*, 2015, pp. 961–966. <https://doi.org/10.1002/9781119223399.ch120>
- [7] Meng L., Zhang N., Pan T., Zhang B. Gradient microstructure in Ni–Cr–Mo ultra-heavy steel plate after tempering. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, vol. 2749, art. no. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2749/1/012006>
- [8] Liu H.B., Zhang H.Q., Li J.F. Thickness Dependence of Toughness in Ultra-Heavy Low-Alloyed Steel Plate after Quenching and Tempering. *Metals*, 2018, vol. 8, art. no. 628. <https://doi.org/10.3390/met8080628>
- [9] Колесников А.Г., Мунтин А.В., Зинягин А.Г., Рингинен Д.А. Распределение деформации по толщине слэба при прокатке на толстолистовом стане. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2013, № 11, с. 32–36.
- [10] Мунтин А.В. *Разработка технологии прокатки толстого листа с заданными свойствами из трубных марок стали на стане 5000*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2014, 22 с.
- [11] Ruan J. 3D FE modelling of plate shape during heavy plate rolling. *Ironmaking & Steelmaking*, 2014, vol. 41, pp. 199–205.