

УДК 621.771

Разработка методики и экспериментальной установки для физического моделирования условий прокатки полос из углеродистой стали на литейно-прокатном комплексе

Половинко Владислав Эдуардович
Алдунин Анатолий Васильевич^(*)

p0lovinkoea@yandex.ru
alav@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Изучены различные методики физического моделирования горячей прокатки полос из углеродистой стали. Выявлены основные преимущества и недостатки представленных способов. Разработана методика моделирования горячей полосы из углеродистой стали на ЛПК. Методика включает в себя моделирование процесса горячей прокатки на стане 260 с соблюдением критериев подобия. Использование клиновидных образцов позволит за счет участков с различной толщины на одной заготовке получить картину структурообразования металла с обжатием от 0 до 50 %.

Ключевые слова: физическое моделирование, углеродистая полосовая сталь, горячая прокатка, литейно-прокатный комплекс, механические свойства, распределение обжатий по проходам

Development of a methodology and experimental setup for physical modeling of carbon steel strip rolling conditions at a casting and rolling complex

Vladislav Eduardovich Polovinko
Anatoly Vasilievich Aldunin^(*)

p0lovinkoea@yandex.ru
alav@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. Various methods for physically modeling hot rolling of carbon steel strips are studied. The main advantages and disadvantages of the presented methods are identified. A method for modeling hot carbon steel strip at a casting and rolling complex is developed. The method includes modeling the hot rolling process on a 260 mill while adhering to similarity criteria. The use of wedge-shaped specimens will allow for obtaining a picture of the metal structure formation with reduction from 0 to 50% due to sections of different thicknesses on a single workpiece.

Keywords: physical modeling, carbon strip steel, hot rolling, casting and rolling complex, mechanical properties, distribution of reductions across passes

Введение. Согласно данным монографии [1], в литейно-прокатном комплексе (ЛПК) окончательная микроструктура горячекатаной полосы во многом зависит от режимов прокатки в его чистовой группе. Оптимально подобранные условия прокатки позволят получить более равномерную структуру готового

продукта. Чем выше уровень разнотекучести в металле, тем ниже показатели ударной вязкости и относительного удлинения, а также, согласно источнику [2], будет наблюдаться увеличение разброса временного сопротивления и предела текучести. Чтобы получить равномерную микроструктуру прокатываемых на ЛПК полос углеродистой, осуществляется физическое моделирование процесса прокатки для выявления оптимальных условий деформации.

Анализ существующих способов моделирования процесса горячей прокатки. Опираясь на информацию из статьи [3], большинство исследований образования микроструктуры сосредоточены либо на моделировании процесса горячей прокатки с эволюцией микроструктуры, либо на процессе охлаждения с фазовым превращением и прогнозированием остаточных напряжений, которые подтверждаются на основе измерений, проведенных на готовых изделиях. Причиной этому служит сложность в моделировании теплового эффекта в процессе охлаждения, поскольку точные измерения температурных полей и эволюции микроструктуры недоступны в реальном процессе прокатки. Даже с таким ограничением сложное деформационное поведение и изменения микроструктуры, обусловленные различными металлургическими механизмами, могут быть эффективно реализованы благодаря достижениям в комплексном моделировании «процесс – микроструктура – механические свойства».

Существует способ моделирования силовых условий прокатки полос при помощи пластометров, используемый в экспериментах [4, 5]. Данный метод позволяет исследовать процесс структурообразования и разупрочнения стального образца при его неоднократном растяжении, скручивании или осадке при высоких температурах. Существуют комплексы физического моделирования, основанные на пластометрах, например Gleeble, которые при помощи программного обеспечения облегчают создание программы для термомеханических испытаний и физического моделирования, а также сбора и анализа полученных данных. Работы [6, 7] показывают, что чаще всего используются круглые образцы диаметром обычно порядка 10 мм, которые нагревают до 1100–1200 °С и деформируют с различными температурами, скоростями деформации и охлаждения. Однако таким методом невозможно изучать структуру из-за медленного охлаждения образцов большого сечения, отсутствия подобий схемы напряженно-деформированного состояния (НДС), условий внешнего трения и теплообмена с рабочим инструментом.

В работах [8, 9] показано, что результатам сжатия или скручивания образцов на высокоскоростных термомеханических пластометрах определяют коэффициенты, применяемых в теоретических и полуэмпирических уравнениях, которые используются для расчета параметров процесса формирования структуры прокатываемых на НШСП полос. Основным недостатком данного метода является слабое соответствие истинному процессу преобразования микроструктуры прокатываемых полос ввиду различия в схемах течения и напряженного состояния деформируемого металла.

Согласно статье [10], классический метод моделирования предполагает использование лабораторного прокатного стана. Он может включать в себя: расчёт течения металла в зазоре между валками для получения вариаций ско-

рости деформации, деформации и напряжения в полосе; определение упругой деформации рабочего вала; расчёт температурных полей полосы и вала. Однако, исходя из работы [11], лабораторные станы либо не обеспечивают достаточно высокую для моделирования скорость деформации (около 100 с^{-1}) образцов, либо не позволяют производить прокатку в несколько проходов с паузами между ними менее 3 с.

Для моделирования процесса непрерывной прокатки используется также специальный лабораторного стана с последовательно расположенными клетями, как это рассказано в источнике [12]. Основным недостатком данного способа является сложность в исследовании закономерностей структурообразования образцов в зависимости от основных технологических параметров (скорость прокатки, обжатия и др.). Это обусловлено отсутствием регулировки этих параметров в широком диапазоне.

Материалы и методы. Моделирование будет проводится при прокатке в один проход нескольких клиновидных образцов размером $5(10) \times 30 \times 150 \text{ мм}$ (рис. 1). Форма образца выбрана согласно труду Бурханова, по которому клиновидная форма исходного образца, по сравнению с плоской формой, не оказывает существенного влияния на структуру прокатываемого металла. Использование клиновидных образцов позволяет существенно сократить число лабораторных экспериментов [13].

Для прокатки в один проход были выделены следующие основные факторы:

- 1) температура прокатки T ;
- 2) относительное обжатие ϵ ;
- 3) время последеформационных выдержек $\tau_{\text{п}}$.

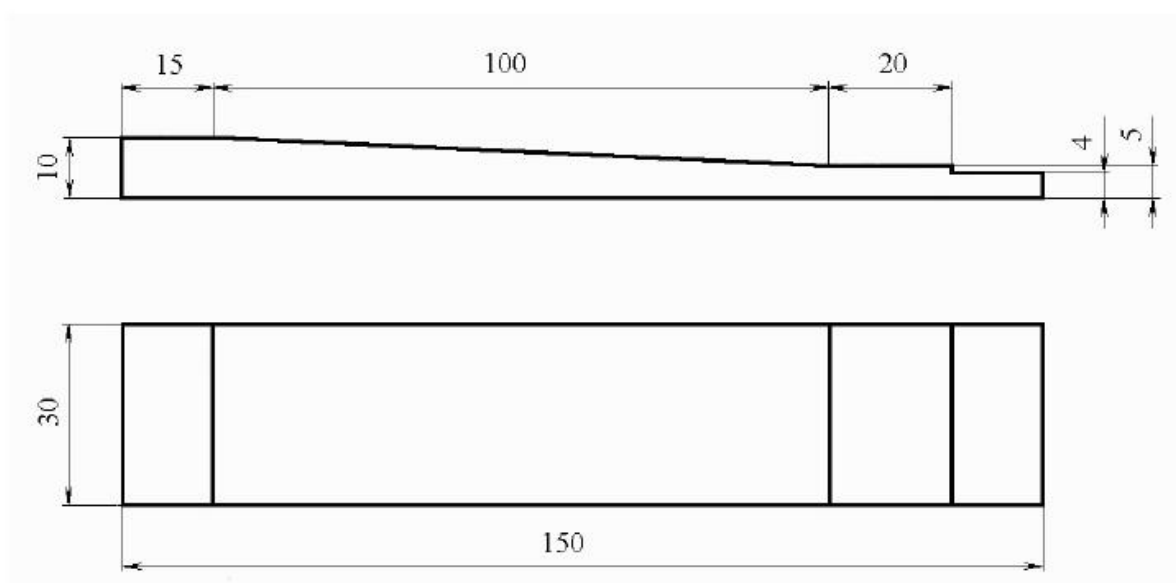


Рис. 1. Эскиз прокатываемого образца

В качестве материала образца выступает сталь 20, химический состав которого представлен в таблице.

Химический состав стали 20, %

C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Ni	Cu
0,19	0,11	0,18	0,004	0,0025	0,019	0,008	0,089	0,096	0,148

В качестве геометрических критериев подобия приняты относительное обжатие и параметр очага деформации. Относительное обжатие ε определяется, %:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (1)$$

где Δh — абсолютное обжатие; h_0 — исходная толщина образца.

Параметр очага деформации представляет собой отношение длины очага деформации к средней толщине образца до и после прокатки:

$$\frac{2l_d}{h_0 + h_1}, \quad (2)$$

где l_d — длина очага деформации, мм; h_1 — толщина образца после прокатки, мм.

Для соблюдения кинематического подобия принято равенство скоростей деформации модели U_M и натуре U_H , при котором время деформации модели и натуре одинаково, т. е.

$$U_M = U_H. \quad (3)$$

В данной работе для определения скорости деформации используется следующая формула, с^{-1} :

$$U = \frac{2V \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}}{h_0 + h_1}, \quad (4)$$

где V — скорость прокатки, м/с; h_0, h_1 — исходная и конечная толщины образца, мм; R — радиус рабочих валков стана, мм.

Тогда скорость прокатки модели будет:

$$V_M = V_H \sqrt{\frac{R_M}{R_H}}, \quad (5)$$

где V_M, V_H — скорости прокатки модели и натуре, м/с; R_M, R_H — радиусы рабочих валков станов модели и натуре, мм.

Для моделирования будет применяться стан Дуо 260 (рис. 2). Установка предусматривает наличие двух печей для исключения влияния температуры нагрева на размер зерна аустенита перед прокаткой. Все образцы аустенизируются в печи 6 при температуре 1100 °С, 15 мин, а затем либо прокатываются сразу, либо после подстуживания на воздухе, выдерживаются перед прокаткой 10 мин в печи 7 при температуре 1000 или 900 °С. Условия моделирования сравниваются с условиями прокатки в чистовой группе стана ЛПК.

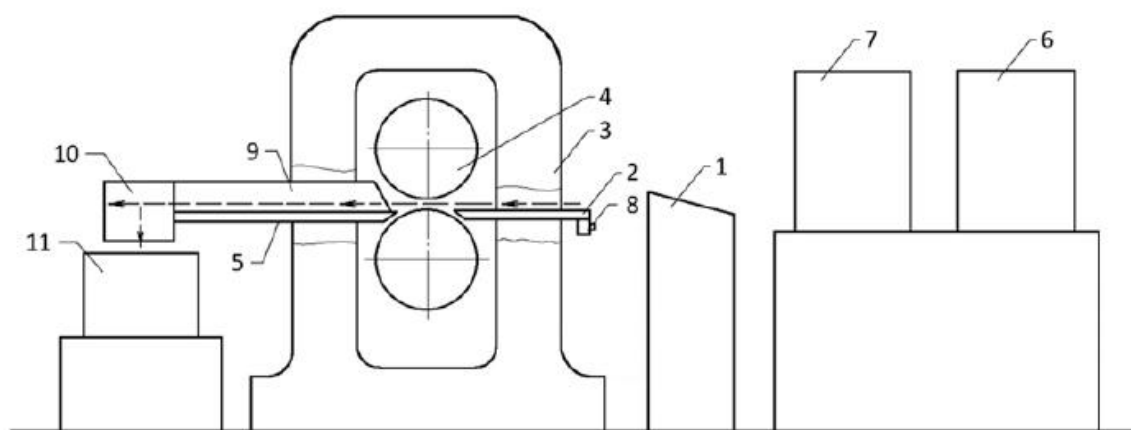


Рис. 2. Схема лабораторного стана Дуо 260:

- 1 — пульт управления; 2 — приемный стол; 3 — станина; 4 — рабочие валки; 5 — выводной стол;
6, 7 — электронагревательные печи; 8 — кнопка пуска блока автоматики; 9 — швеллер;
10 — механизм сброса образца; 11 — закалочный бак

Закключение. На основе изучения различных методов моделирования процессов горячей прокатки в качестве оптимального варианта выбран метод подобия с использованием прокатного стана Дуо 260. Данный способ позволит исследовать процесс образования микроструктуры металла в широком спектре режимов нагрева, обжата и последующего охлаждения. Использование клиновидного образца позволит исследовать микроструктуру металла после относительных обжатий от 0 до 50 %.

Список источников

- [1] Шаталов Р.Л., Колесников А.Г., Алдунин А.В., Мунтин А.В. *Управление качеством полос и листов при горячей прокатке*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, 277 с.
- [2] Кудря А.В., Соколовская Э.А., Траченко В.А. и др. Измерение неоднородности разрушения в конструкционных сталях с разнородной структурой. *MuTOM*, 2015, № 4, с. 12–18.
- [3] Seo Yeon Jo, Seojun Hong, Heung Nam Han, Myoung-Gyu Lee. Modeling and Simulation of Steel Rolling with Microstructure Evolution: An Overview. *Steel Research International*, 2022, vol. 94. <https://doi.org/10.1002/srin.202200260>
- [4] Bo Xu Yun, Mei Yu Yong, Liang Xiao Bao, Yu Liu Zhen, Dong Wang Guo. Modelling of microstructure evolution during hot rolling of a high-Nb HSLA steel. *Journal of Materials Science*, 2010, vol. 45, no. 10, pp. 2580–2590.
- [5] Рудской А.И., Колбасников Н.Г., Зотов О.Г. и др. Исследование структуры и свойств TRIP-сталей на комплексе Gleeble-3800. *Черные металлы*, 2010, № 2, с. 8–14.
- [6] Zhauyt A., Bukayeva A., Tursymbekova Z., Bulekbayeva G., Begendikova Zh., Mambetaliyeva G., Chazhabayeva M. Development of hot rolling technology using the method of physical modeling. *Metalurgija*, 2021, vol. 60, no. 3–4, pp. 387–390.
- [7] Никитенко О.А., Ефимова Ю.Ю., Жеребцов М.С., Копцева Н.В., Барышников М.П., Селиванова Е.С. Формирование ультрамелкозернистой структуры стали в процессах деформации. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*, 2015, № 17 (1), с. 31–41.
- [8] Xue C., Zhang L., Yang W., Sun Z. Статическая рекристаллизация низкоуглеродистых Nb-микролегированных сталей с укрупнением зерна аустенита. *Journal of the University Science and Technology Beijing*, 2008, vol. 30, no. 4, pp. 374–378.

-
- [9] Gomez M., Rancel L., Fernandez B.J., Medina S.F. Evolution of austenite static recrystallization and grain size during hot rolling of a V-microalloyed steel. *Materials Science and Engineering*, 2009, vol. 501, no. 1–2, pp. 188–196.
- [10] Моделирование термомеханической прокатки — путь к снижению затрат при создании новой продукции. *Металлург*, 2010, № 1, 3 с.
- [11] Zhou S.X. An integrated model for hot rolling of steel strips. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 134, pp. 338–351.
- [12] Ленерт В., Нгуен Куонг, Вехаге Х., Вернерс Р. Моделирование измельчения зерна аустенита при прокатке. *Черные металлы*, 1993, № 11, с. 60–68.
- [13] Алдунин А.В., Русаков А.Д., Трайно А.И. *Исследование и разработка технологий производства стальных полос*. Lambert Academic Publishing, 2014, 169 с.