

С.А.Воробей, Г.В.Левченко, С.М.Жучков, В.А.Маточкин

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА ПОЛНОТУ ПРОЦЕССА РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПАУЗАХ МЕЖДУ ДЕФОРМАЦИЯМИ

Разработана методика расчета процесса рекристаллизации аустенита в паузах между деформациями на основе результатов пластометрических испытаний. Предложено учитывать влияние полноты рекристаллизации на формирование структуры проката путем использования показателя «условная дополнительная степень деформации».

Современное состояние вопроса. Одним из важных факторов, влияющих на энергосиловые параметры прокатки и процессы формирования структуры деформированного металла, является полнота протекания рекристаллизации в паузах между деформациями. Известно три основных подхода к определению времени рекристаллизации после горячей деформации металла. Первый состоит в экспериментальных исследованиях процесса рекристаллизации на основе исследования структуры [1–2]. Второй – в использовании экспериментальных данных по определению сопротивления металла деформации при двукратном нагружении образцов (полноты разупрочнения за время пауз между деформациями) [3]. Третий заключается в расчете времени рекристаллизации на основе скорости диффузионных процессов, зависящей от энергии активации диффундирующих элементов [4–6]. Первый подход весьма трудоемок даже при использовании методов планирования экспериментов. Третий при использовании теоретических зависимостей зачастую дает значительные погрешности. Поэтому при данном подходе в математических моделях, как правило, используются эмпирические коэффициенты, определяемые экспериментально, что позволяет повысить точность расчетов.

Постановка задачи. В настоящей работе применили второй подход. При этом использовали собственные экспериментальные данные по исследованию процессов разупрочнения на пластометре [7–8], результаты известных из литературы результатов [9–11], а также обобщающие зависимости, разработанные в Институте черной металлургии для описания протекания процесса разупрочнения [12].

Изложение основных материалов исследования.

На рис. 1 показан пример изменения сопротивления металла деформации при двукратном нагружении на пластометре [13].

Для расчета сопротивления металла деформации в начале второго нагружения нами разработана зависимость [8]:

$$\sigma = \sigma_0 * (\sigma_k / \sigma_0)^{\exp(-b \cdot \tau)}, \quad (1)$$

где σ_0 – сопротивление металла деформации при степени деформации близкой к нулю;

σ_k – сопротивление металла деформации в конце первого цикла нагружения;

τ – время паузы;

b – коэффициент разупрочнения металла.

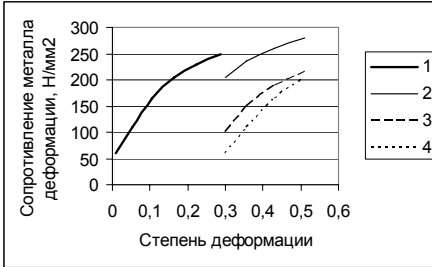


Рис. 1. Изменение сопротивления металла деформации при первом (1) и втором (2–4) нагружении на пластометре. Сталь марки 12ХМ. Температура 850°C, скорость деформации 15 с⁻¹. Время пауз: 0,1 (2); 1,0 (3) и 3,0 с (4).

Экспериментальные значения коэффициента разупрочнения для некоторых сталей, полученные в результате исследований на пластометре ИЧМ, приведены на рис. 2 [13].

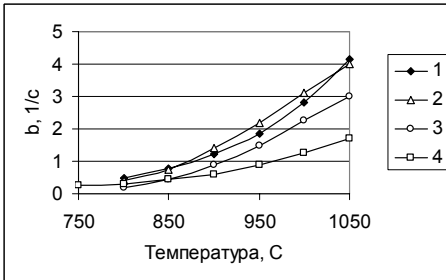


Рис. 2. Экспериментальные зависимости коэффициента разупрочнения от температуры для сталей марок: 1 – СтЗсп, 2 – 12ХМ, 3 – 15ГБ, 4 – 65Г

Нами предложено рассчитывать коэффициент разупрочнения в зависимости от температуры металла (t) и его химического состава, выраженного посредством углеродного эквивалента (C_3):

$$b = 1,15 \cdot C_3^{-0,66} \cdot (t/1000)^8 \quad (2)$$

С использованием выражения (1) можно рассчитать время разупрочнения стали после деформации, которое при использованном подходе обычно принимается соответствующим времени рекристаллизации аустенита. При этом доля рекристаллизованного объема пропорциональна квадрату степени разупрочнения [3]. За момент окончания рекристаллизации приняли время, соответствующее остаточной доле нерекристаллизованного аустенита 1%. В этом случае из выражения (1) можно получить зависимость для расчета времени рекристаллизации:

$$\tau = \ln[\ln(\sigma_k/\sigma_0)/0,005]/b \quad (3)$$

На рис. 3 показано сравнение результатов расчета времени рекристаллизации после горячей деформации стали марки СтЗ по разработанной методике и по экспериментальным данным пластометрических исследо-

ваний авторов работы [9]. Степень деформации 0,36, скорость деформации 10 с^{-1} .

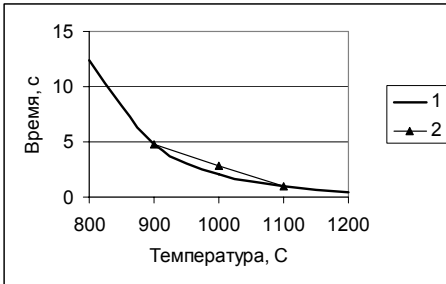


Рис. 3. Зависимость времени рекристаллизации после горячей прокатки стали марки Ст3 от температуры. 1 – расчет по разработанной методике, 2 – расчет по экспериментальным данным работы [9].

Для учета влияния неполного разупрочнения (неполной рекристаллизации) металла на сопротивление деформации в последующих проходах можно использовать такой показатель, как условная дополнительная степень деформации. В качестве этого показателя принимается степень деформации, при которой сопротивление деформации при нагружении разупрочненного металла равно его остаточному значению при неполном разупрочнении после предыдущего прохода (при данной температуре и скорости деформации) [14, 13].

На рис. 4 показаны результаты расчетов изменения объема рекристаллизованного аустенита и условной дополнительной степени деформации от времени для стали марки Ст3.

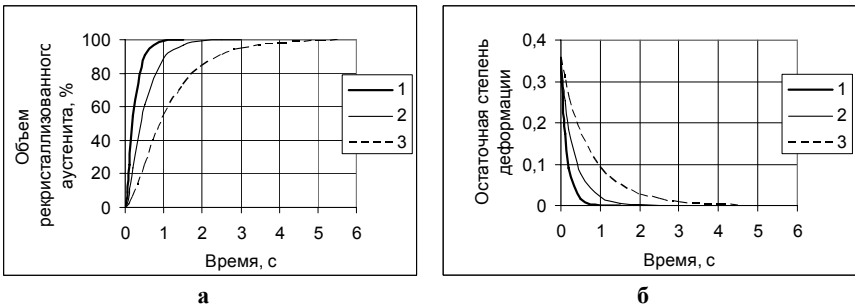


Рис. 4. Зависимость объема рекристаллизованного аустенита (а) и дополнительной степени деформации (б) от времени после деформации. Марка стали Ст3, степень деформации 0,36, температура: 1–1100, 2–1000, 3–900⁰С.

Анализ полученных результатов показывает, что уже при рекристаллизации 80% аустенита за время паузы между деформациями влияние неполного разупрочнения стали на энергосиловые параметры прокатки можно не учитывать.

Более сложным является вопрос о влиянии степени завершенности процесса рекристаллизации на формирование структуры стали после де-

формации в последнем проходе. Для прогнозирования величины зерна после деформации рекристаллизованного аустенита за один проход используются диаграммами рекристаллизации. Наиболее сложный и неоднозначный характер влияния степени деформации на размер зерен аустенита наблюдается в диапазоне $\varepsilon=5-20\%$. Увеличение степени деформации более 20%, как правило, приводит к небольшому монотонному уменьшению размеров зерен аустенита [15]. В связи с этим, при однократной деформации является принципиальным обеспечение степени деформации, превышающей критические значения. При деформации не полностью рекристаллизованного аустенита сохраняется влияние предыдущих проходов. Это приводит к смещению критических деформаций в последнем проходе в сторону меньших значений степени деформации, вплоть до полного устранения этой области.

По нашему мнению, для описания указанного явления целесообразно использовать приведенный выше показатель «условная дополнительная степень деформации». Это подтверждается опытом работы широкополосных станов горячей прокатки. В частности, в работе [16] приведены обобщенные данные о скоростях прокатки полос из низкоуглеродистых сталей в чистой группе клетей широкополосного стана, при которых деформацию в последней клетке с позиций формирования структуры следует рассматривать без учета предыдущих клетей. На основе этих данных нами было рассчитано время нахождения металла в последнем межклетьевом промежутке, при котором можно не учитывать влияние предыдущих деформаций. Результаты приведены на рис.5. Здесь же приведены результаты расчетов этого времени по разработанной методике с позиции достижения величины условной дополнительной степени деформации не более 1%.

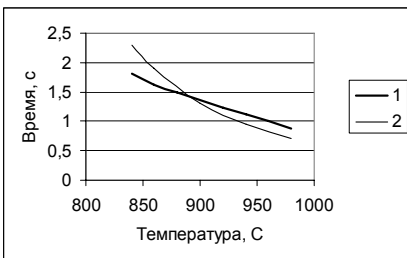


Рис. 5. Зависимость времени паузы перед последним проходом, необходимой для устранения влияния предыдущих деформаций при прокатке в чистой группе широкополосного стана: 1 – по данным работы [16], 2 – расчет по предложенной методике.

Можно отметить достаточно близкие значения времени, полученные в первом и втором случае. Это подтверждает правомерность использования показателя «условная дополнительная степень деформации» для определения влияния полноты прохождения процессов рекристаллизации на структуру проката.

На рис. 6 показаны результаты расчета минимального времени пауз между проходами, при котором можно не учитывать влияние предыдущей деформации. Степень деформации 0,22, скорость деформации 10 с^{-1} .

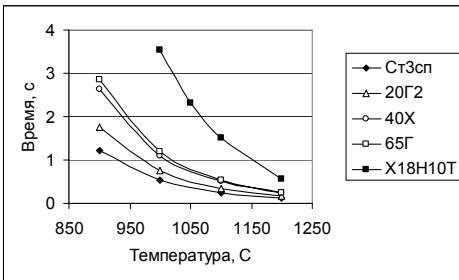


Рис. 6. Расчетное минимальное время пауз между проходами, при котором можно не учитывать влияние предыдущей деформации

С использованием разработанных методик была выполнена оценка влияния режимов прокатки на стане 850 БМЗ и в блоке клетей для прокатки катанки на полноту процесса рекристаллизации в паузах между деформациями. Стан 850 – одноклетьевой реверсивный. Используются непрерывнолитые заготовки сечением 250×300 и 300×400 мм длиной 2,5–5,5 м. Продукция стана – прокат круглого сечения диаметром 80–150 мм и квадратного сечения со стороной 100, 125 и 135 мм. Температура нагрева заготовок составляет $1150\text{--}1200^\circ\text{C}$, температура конца прокатки $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$. Относительная деформация за один проход составляет от 14 до 27%. Машинное время одного прохода 1,8–7,7 с, время пауз между проходами 2,5–7 с. Таким образом, время паузы между прокаткой центрального участка раската в смежных проходах составляет от 4,5 до 14 с. Время паузы между предпоследним и последним проходами для переднего конца раската составляет примерно 7 с. Сравнивая эти параметры прокатки с данными, приведенными на рис. 6 и рис. 4а, видно, что для данных условий процесс рекристаллизации аустенита завершается за время пауз между проходами. В связи с этим, величина зерна в готовом прокате определяется фактически условиями последнего пропуска (в данном случае влияние исходной литой структуры не рассматривается).

Условия деформации в чистовом блоке клетей проволочного стана принципиально отличаются от условий прокатки на стане 850. Вследствие малого расстояния между клетями в блоке (0,8–1,2 м) и высоких скоростей прокатки (50–100 м/с) время пауз между обжатиями минимально (0,01–0,06 с). Поэтому, несмотря на относительно высокую температуру проката ($1000\text{--}1100^\circ\text{C}$), статическая рекристаллизация аустенита в межклетевых промежутках практически не происходит. В этих условиях при одном и том же химическом составе стали величина зерна аустенита зависит главным образом от температуры конца прокатки, а зерна феррита – от условий последеформационной обработки проката.

Для прогнозирования величины зерна аустенита после деформации можно использовать зависимость, предложенную авторами работы [2]:

$$D_r = D_0 / (A \cdot \varepsilon^m) \quad (4),$$

где D_0 – средний диаметр зерна до деформации;

D_r – средний диаметр зерна после первичной рекристаллизации;

ε – степень деформации;

A и m – коэффициенты, зависящие от марки стали.

Формула (4) применима при степенях деформации больше критических. С целью учета влияния неполной рекристаллизации аустенита в паузах между деформациями в выражение (4) необходимо подставлять степень деформации с учетом условной дополнительной степени деформации перед проходом. Для расчета средней величины зерна феррита после $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения применяется методика, приведенная в работе [17].

Выводы.

Разработана методика расчета процесса рекристаллизации аустенита в паузах между деформациями на основе результатов пластометрических испытаний. Методика позволяет учитывать влияние неполной рекристаллизации на сопротивление деформации стали и формирование структуры в горячекатаном прокате.

1. *Мухин Ю.А., Шкатов В.В., Бобров Н.А.* Влияние параметров горячей прокатки на кинетику рекристаллизации аустенита низкоуглеродистой стали // Тонколистовая прокатка.– Воронеж, ВПИ, 1983. – С.50–54.
2. *Преобразование* зерна при первичной рекристаллизации / М.А.Штремель, В.И.Лизунов, В.В.Шкатов и др. // МиТОМ. – 1984. – № 6. – С.2–5.
3. *Yamamoto S.* The effect of solute atoms on recovery and recrystallization of austenite // Tetsu to hagane. – 1986. –v. 13. – N 67, s. 1157.
4. *Sellars C.M., Whiteman J.A.* Recrystallization and grain growth in hot rolling // Metal Science March. – 1979.– April. – S.187–194.
5. *Liska S., Worniak J.* Matematicky model pro analyzy technologickyh podminek valcovani oceli za tepla // Hutnicke aktualiti. WHZ. – V. 22. – № 9. – 1981. – P.1–49.
6. *Том Т., Ханак Я.* Влияние величины последнего обжатия на размер зерна горячекатаной углеродистой стали// Сталь. – 1984. – № 3.– С.62–65.
7. *Хижняк Д.Д., Воробей С.А.* Изменение сопротивления деформации низколегированных сталей при статическом разупрочнении во время междеформационных пауз // В кн.: Улучшение качества горячекатаной широкополосной стали. –М.: Металлургия, 1986. – С.67–70.
8. *Левченко Г.В., Воробей С.А.* О сопротивлении деформации стали при горячей прокатке/ Изв. АН СССР. Металлы. – 1987. – № 3. –С.83–87.
9. *Исследование процессов* разупрочнения стали на пластометре / Д.И.Суяров, Р.В.Лель, В.И.Шилов и др.//Изв. АН СССР. Металлы. – 1969.– № 3.– С.86–90.
10. *Шварцбарт Я.С., Никитин Г.С., Зуев И.Г.* Моделирование процесса многоступенчатого деформирования на машине для кручения // Заводская лаборатория. – 1976. – № 4.– С.473–476.

11. *Расчет усилий при непрерывной горячей прокатке* // В.Н.Жучин, Г.С.Никитин, Я.С.Шварцбарт, И.Г. Зув. – М.: Металлургия, 1986.–198 с.
12. *Воробей С.А., Левченко Г.В. Особенности расчета сопротивления деформации стали при непрерывной горячей прокатке* // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб.тр.ИЧМ.* – 2003. – Выпуск 6. – С.191–196.
13. *Надежность технологического процесса производства листового проката* // В.Л.Мазур, С.А.Воробей, Д.Л.Романовский и др. – К.: Техніка, 1992. – 170 с.
14. *Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов.* – М.: Металлургия, 1972. – 152 с.
15. *Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов.*– М.: Металлургия, 1978.– 568 с.
16. *Франценюк И.В. Франценюк Л.И. Современное металлургическое производство.* – М.: Металлургия, 1995.– 528 с.
17. *Штремель М.А., Лизунов В.И., Шкатов В.В. Преобразование зерна при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении в малоуглеродистой стали.* // *МиТОМ.* – 1969. – № 10. – С.8–10.

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук И.Ю.Приходько