

С.А.Воробей

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРЕН АУСТЕНИТА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ

Разработана методика расчета размера зерен аустенита при нагреве, после деформации и охлаждения проката, учитывающая содержание углерода в стали. Показано удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений диаметра зерен аустенита. Методику можно использовать для условий производства полосового и сортового проката широкого размерного сортамента.

Современное состояние вопроса. Уровень свойств горячекатаного металла в значительной степени определяется параметрами структуры, которая, в свою очередь, зависит от температурно–деформационных режимов обработки. Задачу выбора рациональных параметров технологии производства, обеспечивающих требуемые параметры структуры, можно решать несколькими путями. Наиболее часто эту задачу решают на основе накопленного производственного опыта. Однако в последние годы все большее распространение находят методы математического моделирования, которые позволяют без проведения экспериментальных исследований определять рациональные технологические параметры прокатки.

Цель работы. В Институте черной металлургии под руководством А.В.Ноговицына был разработан комплекс математических моделей формирования микроструктуры и свойств горячекатаного проката [1–5]. Целью настоящей работы было уточнение методов прогнозирования диаметра зерен аустенита при нагреве и последующего изменения диаметра зерен аустенита после деформации и статической рекристаллизации.

Изложение основных материалов исследования. Прогнозирование размера зерен аустенита при нагреве имеет определенные трудности, несмотря на то, что известно достаточно много методик расчета [6]. Связано это с тем, что при проведении экспериментальных исследований наблюдается весьма значительный разброс данных о величине зерен аустенита (см., например, рис.1, на котором приведены данные работ [7, 8]).

На размер зерен аустенита при нагреве оказывают влияние многие факторы, основные из которых следующие [6]: содержание химических элементов в стали; кинетика процессов растворения карбидов и нитридов; чистота стали; способ выплавки стали; скорость нагрева. Например, одним из наиболее значимых факторов является чистота стали, причем это влияние тем большее, чем выше температура нагрева. По данным, приведенным в работе [6], при температурах нагрева более 1100⁰С размер зерен в чистой стали может быть выше в 2–8 раз по сравнению с обычной (промышленного производства). Кроме того, на результаты исследований влияет метод определения величины зерен аустенита. Применение различных методов может приводить к отличию результатов на 10–50% [6].

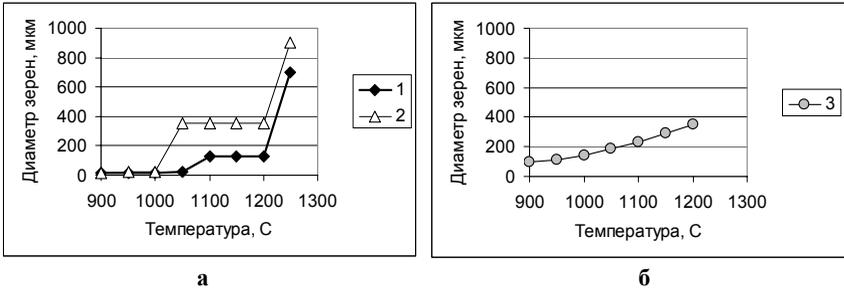


Рис. 1. Зависимость диаметра зерен аустенита от температуры нагрева для стали типа 09Г2: а – по данным работы [7], б – по данным работы [8]. 1 – минимальный размер зерен, 2 – максимальный, 3 – средний.

Учитывая сказанное, на практике используют упрощенные эмпирические зависимости, коэффициенты которых получают в каждом конкретном случае. Основные виды этих моделей приведены и проанализированы в работе [6]. Наиболее часто используют следующие модели (1–4).

$$F = a \cdot \exp(-b/T); \quad (1)$$

где F – площадь зерна; T – температура нагрева; a и b – коэффициенты.

В некоторых работах коэффициент b представляют в виде отношения Qa/R , где Qa – энергия активации роста зерен, R – универсальная газовая постоянная. Вместе с тем, в работе [9] показано, что полученная на основе экспериментальных исследований величина Qa не соответствует истинной энергии активации.

$$\ln(F) = a + b \cdot T; \quad (2)$$

$$\ln(F) = \ln(F_0) + b \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где F_0 – расчетный размер зерна при температуре A_{c3} ; ΔT – превышение температуры над A_{c3} .

По нашему мнению модели вида (3), несмотря на большую сложность их получения, использовать нецелесообразно, так как прогнозировать размер зерна при температуре A_{c3} не проще, чем при реальных температурах нагрева (1100–1250°C).

В работе [6] предложено использовать модели следующего вида:

$$\ln(F) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 \quad (4)$$

Авторы работы [6] считают, что модель (4) имеет более широкий диапазон применимости, хотя во многих случаях вполне пригодны все указанные виды моделей. В работе [6] приводятся численные значения коэффициентов модели (4) для различных марок стали в зависимости от содержания многих химических элементов (за исключением углерода). Однако известно, что именно содержание углерода в наибольшей степени влияет на размер зерен аустенита при нагреве. В частности, в этой же работе [6] приведены данные, показывающие, что при увеличении содержания углерода от 0,12 до 2% размер зерен вначале увеличивается, а затем уменьшается (рис.2 [6]). Причем максимальный размер зерен при разной

температуре нагрева соответствует разному содержанию углерода (см.рис.2).



Рис.2. Влияние содержания углерода на размер зерен аустенита при нагреве [6]. Температура нагрева 1100 (1) и 1200°C (2).

Следует отметить, что размеры зерен аустенита низкоуглеродистых сталей ($C \leq 0,2\%$), приведенные на рис.2, существенно меньше, чем по данным других работ (например, [7,8]). Тем не менее, эти данные, по нашему мнению, можно использовать для описания относительного влияния углерода на размер зерен аустенита при нагреве.

В целом, проведенный анализ показывает, что, обеспечить высокую точность прогнозирования размеров зерен аустенита при нагреве стали весьма сложно. В связи с этим, на наш взгляд, при прогнозировании размеров зерен аустенита в процессах горячей прокатки целесообразно использовать упрощенные модели роста зерен при нагреве стали. Это обусловлено также тем, что деформация значительно снижает влияние исходного размера зерен (что будет показано далее).

На основании результатов собственных исследований, а также литературных данных [6–8, 10–11] (рис.3) диаметр зерен аустенита низкоуглеродистых и низколегированных сталей с содержанием углерода в пределах 0,07–0,2% нами предложено рассчитывать по зависимости:

$$DA_0 = 0,245 \cdot \exp(0,0057 \cdot t_0), \quad (5)$$

где DA_0 – средний диаметр аустенитных зерен после нагрева стали, мкм; t_0 – температура нагрева, °C.

Результаты расчета диаметра зерен аустенита по предложенной зависимости (5) и модели (4) с коэффициентами, приведенными в работе [6], показаны на рис.3. В расчетах коэффициентов модели (4) учитывали содержание в стали марганца, кремния, хрома, никеля и меди. Результаты показывают, что использование модели (4) дает несколько заниженные значения размера зерен аустенита при температурах нагрева более 1100°C. На наш взгляд, данная погрешность обусловлена тем, что коэффициенты модели (4) получены, в основном, на базе экспериментальных данных для легированных сталей.

Таким образом, предложенная модель (5) позволяет более точно прогнозировать размеры зерен аустенита при нагреве низкоуглеродистых и низколегированных сталей. С учетом влияния углерода зависимость имеет следующий вид:

$$DA_0 = 0,245 \cdot \exp(0,0057 \cdot t_0) \cdot (0,64 + 3 \cdot C) \quad (6)$$

С целью проверки данной зависимости в лабораторных условиях были выполнены экспериментальные исследования влияния температуры нагрева на размер зерен аустенита стали марки 45 (содержание углерода 0,48%)¹. Результаты показаны на рис.4.

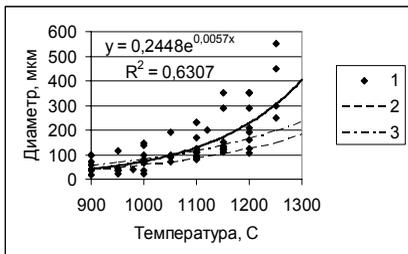


Рис. 3. Зависимость диаметра зерен аустенита от температуры нагрева стали, содержащей 0,07–0,2% углерода. 1 – экспериментальные данные [6–8, 10–11], 2 и 3 – минимальный и максимальный расчетный размер зерен по модели (4) с коэффициентами, приведенными в работе [6].

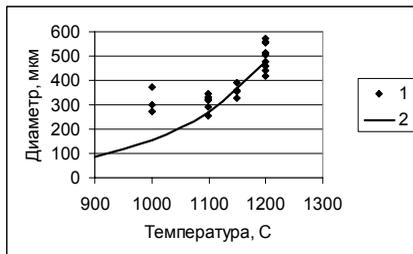


Рис. 4. Зависимость диаметра зерен аустенита от температуры нагрева стали, содержащей 0,48% углерода. 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет по зависимости (6).

Расчеты по предложенной зависимости (6) дают удовлетворительные результаты для стали марки 45 в интервале температур нагрева 1100–1200⁰С. Большая ошибка прогнозирования размера зерен аустенита при температуре нагрева 1000–1050⁰С объясняется существенным разбросом экспериментальных данных в этой области (см. рис.1).

Проведенный анализ показал, что зависимость (6) применима при содержании углерода в стали от 0,07 до 1% и температуре нагрева 1100–1200⁰С.

В базовых математических моделях Института черной металлургии [1–5] для расчета величины зерен аустенита после деформации использовали две методики. Первая разработана С.М.Sellars [12]:

$$DA_\delta = f(Z) \cdot \varepsilon^a \cdot DA_0^b, \quad (7)$$

$$DA_{\delta 1} = DA_\delta^{a1} + b1 / \exp[Qa_1 / (R \cdot T)], \quad (8)$$

где $Z = u \cdot \exp[Qa / (R \cdot T)]$; DA_δ – диаметр зерна аустенита после деформации; u – скорость деформации; ε – степень деформации; a , b , $a1$, $b1$ – коэффициенты.

Формула (8) используется при времени выдержки (паузы) больше времени первичной рекристаллизации (τ_p) при степени рекристаллизации 95%, которое рассчитывается по выражению:

$$\tau_p = a2 \cdot Z^{b2} \cdot \varepsilon^2 \cdot DA_0^{d2} \cdot \exp[Qa / (R \cdot T)], \quad (9)$$

¹ Эксперименты проведены совместно с Т.В.Грицай и С.А.Здоровцом

где a_2, b_2, c_2, d_2 – коэффициенты.

Вторая методика получена авторами работы [10]:

$$DA_0/DA_\delta = A \cdot \epsilon^m, \quad (10)$$

где A и m – коэффициенты.

Авторы работы [10] получили следующие значения этих коэффициентов: для стали 08пс $A = 4,9$, $m = 0,48$; для стали СтЗсп $A = 4,3$, $m = 0,59$.

Первая методика, в отличие от второй, учитывает температуру и скорость деформации, однако требует определения большого количества коэффициентов для каждой марки стали, что усложняет ее применение.

В работах [13–15] применили аналогичные методики. В частности в работах [14, 15] предложены следующие зависимости для расчета величины рекристаллизованных зерен аустенита и времени рекристаллизации.

Для стали марки 08кп:

$$DA_\delta = 25 \cdot \{\log[Z/(8,5 \cdot 10^9)]/0,067\}^{-2/3} \cdot DA_0^{0,5} / \epsilon_u; \quad (11)$$

$$\tau_p(50 \%) = 5 \cdot 10^{-21} \cdot \epsilon_u^{-4} \cdot DA_0^2 \cdot \exp[320000/(R \cdot T)] \quad (12)$$

Для стали марки СтЗ:

$$DA_\delta = 6,2 + 156 \cdot DA_0^{0,5} / \epsilon_u^{0,65} / \exp[35000/(R \cdot T)], \quad (13)$$

$$\tau_p(50 \%) = 2,3 \cdot 10^{-15} \cdot \epsilon_u^{-2,5} \cdot DA_0^2 \cdot \exp[230000/(R \cdot T)], \quad (14)$$

где ϵ_u – истинная степень деформации.

Сравнение коэффициентов зависимостей (11) и (13), (12) и (14) показывает весьма большое их отличие, что подтверждает наш вывод о необходимости их экспериментального определения для каждой марки стали и косвенно указывает на недостаточную надежность методики [12], которая, по сути, лежит в основе этих зависимостей. Кроме того, экспериментальные исследования не показывают существенной зависимости размера зерен аустенита после первичной рекристаллизации от температуры, которая предусмотрена в моделях (7), (11), (12) (например, [10,16]). Зависимость размеров зерен аустенита от температуры наблюдается только при дальнейшей собирательной рекристаллизации.

Наш опыт применения выражений (7) – (9) показал, что зачастую расчетные значения времени рекристаллизации и диаметра рекристаллизованных зерен существенно отличаются от экспериментальных. Аналогичный вывод можно сделать и по применению методик [14,15].

Вторая использованная нами ранее модель (10) значительно проще. Однако, по нашему мнению, ее авторы [10] допустили методическую неточность, приняв линейную зависимость между диаметром исходного и рекристаллизованного после деформации зерна аустенита. В большей степени экспериментальным данным соответствует допущение о пропорциональности диаметра рекристаллизованных зерен величине $(DA_0)^b$ [12, 13]. В настоящей работе величину коэффициента b приняли равной 0,5, также как и в ряде других известных работ, например, [14, 15]:

Принятое уточнение позволило нам на основе экспериментальных данных работы [12] получить следующую зависимость для расчета диаметра рекристаллизованного зерна аустенита после деформации:

$$DA_0 = 2,45 \cdot DA_0^{0,5} / \epsilon_u^{0,4} \quad (15)$$

Причем, если авторы работы [10] для своей модели приводят различные коэффициенты для стали 08пс и СтЗсп, то зависимость (15) дает хорошее совпадение результатов для обеих сталей.

Сравнение результатов расчета диаметра зерен аустенита с экспериментальными данными, приведенными в работе [7], показало следующее. При степенях деформации более 0,2 наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных данных с экспериментальными. При меньших степенях деформации (0,16) расчетные значения диаметра зерен аустенита существенно ниже экспериментальных. Причем погрешность увеличивается с возрастанием диаметра исходных зерен аустенита. Это можно объяснить следующими причинами. Известно, что при деформации менее 20 % наблюдается весьма большой разброс размера зерен аустенита. Кроме того, для этой области деформации соотношение диаметров исходных и деформированных зерен аустенита ($KD = DA_0/DA_0^{0,5}$) не сохраняется постоянным (рис.5). Поэтому возможность прогнозирования размеров зерен аустенита в этой области деформации весьма проблематична, что подтверждается результатами работы [10].

Кроме того, методика определения размеров зерен аустенита, использованная авторами работы [7], предусматривала закалку образцов сразу после деформации. В тоже время в работе [16] показано, что непосредственно после деформации стали менее чем на 20% наблюдается резкий рост размеров зерен аустенита. Зачастую размеры зерен аустенита превышают исходные. Однако при выдержке после деформации в течение определенного времени зерна аустенита вначале значительно измельчаются, а затем в течение определенного времени практически не изменяются. Длительность периода измельчения зерен зависит от температуры. При температуре металла 1050⁰С длительность этого периода составляет примерно 30 с, а при температуре 940⁰С – 60 с. Однако при степенях деформации более 20% изменение размеров зерен аустенита в процессе последеформационной выдержки небольшое.



Рис. 5. Влияние степени деформации на соотношение диаметров исходных и деформированных зерен аустенита. Размер исходных зерен 100 (1), 200 (2) и 300 мкм (3). Экспериментальные данные [7].

Проведенный нами анализ показал, что при реальных значениях параметров прокатки углеродистых и низколегированных сталей на действующих станах (температуре 900–1150⁰С, степени деформации 20–45%, скорости деформации более 10 с⁻¹, время пауз между проходами – до 20–30 с) целесообразно использовать полученную нами зависимость (15). Большие ошибки в прогнозировании размера зерен аустенита по предложенной модели можно ожидать только в первом и втором проходах после нагрева заготовки при степени деформации менее 20%. В последующих проходах за счет деформационного измельчения зерен погрешность прогнозирования будет небольшой.

Сравнение результатов расчета диаметра зерен аустенита с экспериментальными данными в интервале температур деформации 850–1050⁰С, приведенными в работах [11,16] показано на рис.6.

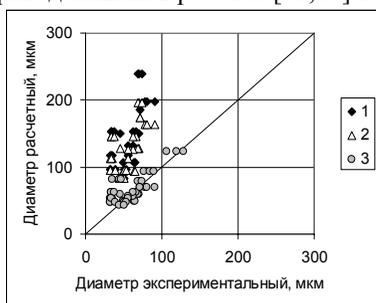


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных значений диаметра рекристаллизованных после горячей деформации зерен аустенита. 1 – зависимость (10), 2 – зависимость (13), 3 – предложенная зависимость (15).

Эти данные подтверждают возможность применения полученной зависимости (15) для расчета диаметра зерен аустенита при прокатке.

Моделирование размера зерен аустенита при многопроходной прокатке требует определения степени рекристаллизации металла за время пауз. Выбор методики для расчета кинетики статической рекристаллизации после деформации подробно изложен в работе [17]. В таблице 1 приведены дополнительные данные расчетов времени рекристаллизации по различным методикам. Расчеты выполнены для условий деформации образцов из стали Ст3 на пластометре [18]. Степень деформации 0,36, скорость деформации 10 с⁻¹.

Таблица 1. Время рекристаллизации стали Ст3

Методика	Степень рекристаллизации, %	Время рекристаллизации (с) при температуре, ⁰ С		
		900	1000	1100
Данные работы [18]	99	4,8	2,4	0,9
Методика [15]	95	6,0	0,9	0,2
Методика [19]	99	14,9	6,0	2,5
Разработанная методика [19]	99	4,6	2,0	0,9
	95	3,0	1,3	0,6

Методика работы [19] предусматривает расчет на основе данных об

энергии активации низкоуглеродистых сталей. Приведенные данные показывают, что данная методика дает большую погрешность. Аналогичная методика, приведенная в работе [15], и предусматривающая уточнение коэффициентов данной зависимости, существенно снижает погрешность расчета. Однако само выражение $\exp[Qa/(R \cdot T)]$ не вполне отвечает действительному влиянию температуры на время рекристаллизации. Очевидно, в этих методиках необходимо учитывать изменение величины Qa от температуры.

С целью оценки влияния погрешности расчета размера зерен аустенита при нагреве на размеры зерен аустенита после деформации выполнили расчеты с использованием модели (15). Полученные данные показывают, что уже после третьего–четвертого проходов влияние исходного размера зерен (после нагрева) становится малозначимым. Таким образом, для моделирования процессов структурообразования при многопроходной прокатке точность прогнозирования размера зерен аустенита при нагреве не имеет решающего значения. Значительно важнее иметь надежные модели прогнозирования влияния параметров деформации на размеры зерен аустенита.

Разработанная методика обеспечивает удовлетворительные результаты для прогнозирования размеров зерен аустенита применительно к станам непрерывной прокатки, на которых производят профили небольших сечений с окончанием деформации при температурах близких к $A_{г3}$. В тоже время при прокатке в области высоких температур с большими паузами между проходами (большими, чем время первичной рекристаллизации), а также при прокатке крупных профилей с последующим охлаждением на воздухе необходимо учитывать рост зерна аустенита. В базовой модели Института черной металлургии [1–5], так же, как и в работах [12–15], этот фактор учитывается зависимостями вида (8) с различными коэффициентами. С целью учета снижения температуры при охлаждении проката расчет выполняется пошагово, причем на каждом шаге значения температуры задаются в соответствии с кривыми охлаждения. Наш анализ показал, что при малых скоростях охлаждения (менее $2\text{--}5^{\circ}\text{C}/\text{с}$) или при изотермической выдержке возможна большая погрешность прогнозирования размера зерен аустенита по выражениям типа (8). В этих случаях расчетный диаметр аустенита может увеличиваться до нереальных значений. В связи с этим в настоящей работе для данного случая нами разработана другая методика расчета размеров зерен аустенита. Принято, что при данной температуре металла максимальный размер зерен аустенита соответствует расчетному для процесса нагрева (DA_0), который определяется по зависимости (6), а рост зерен аустенита отвечает уравнению Аврами. Окончательное выражение для расчета диаметра зерен аустенита имеет вид:

$$DA_{01} = DA_0 + (DA_0 - DA_0) [1 - \exp(-\beta \cdot \tau^n)], \quad (16)$$

где коэффициенты β и n зависят от температуры металла.

Расчет ведется пошагово и прекращается при достижении значения DA_{01} равным DA_0 для текущей температуры.

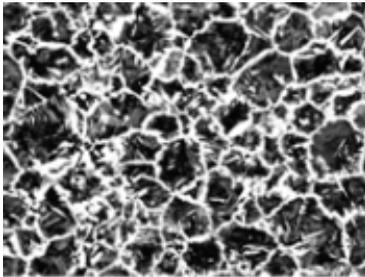
С целью проверки разработанной методики были выполнены расчеты величины зерен аустенита для условий производства круглого проката диаметром 90–150 мм из заготовки сечением 300×400 мм.

Параметры исследованного проката, экспериментальные и расчетные значения диаметра зерен аустенита приведены в табл. 2. Размеры зерен в таблице приведены для $\frac{1}{2}$ радиуса проката. Структура проката показана на рис. 7.

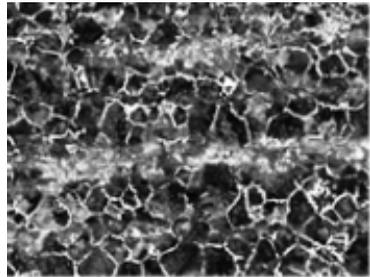
Таблица 2. Параметры опытного проката

Номер варианта	1	2	3	4
Марка стали	45		36Г2С	С45Е
Содержание углерода, %	0,43		0,37	0,44
Диаметр проката, мм	115	90	150	95
Температура конца прокатки, °С	1120	1090	1140	1100
Диаметр зерен аустенита измеренный, мкм	$\frac{50-200^*}{90}$	$\frac{40-130}{60}$	$\frac{50-200}{85}$	$\frac{40-150}{65}$
Диаметр зерен аустенита расчетный, мкм	79	64	87	67

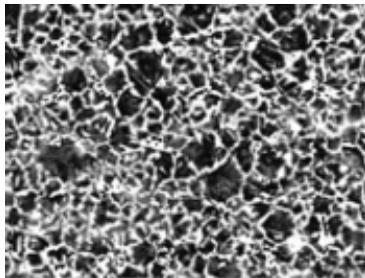
Примечание: * – в числителе минимальное и максимальное значение диаметра зерен, в знаменателе – среднее.



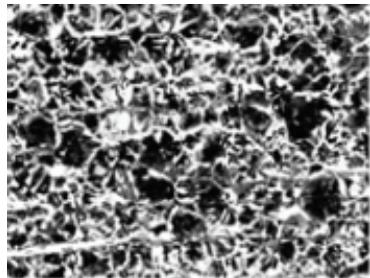
1



3



2



4

Рис. 7. Микроструктура опытного проката. 1–4 – номера вариантов (см. табл.2).

Расчетные значения диаметра зерен аустенита близки к экспериментальным и, в основном, правильно отражают влияние режимов прокатки и охлаждения.

Выводы. Разработаны модели для прогнозирования величины зерен аустенита, которые можно использовать при производстве полосового и сортового проката широкого размерного сортамента на станах с различным составом оборудования.

1. *Математическая модель формирования микроструктуры и механических свойств углеродистой и низколегированной полосовой горячекатаной стали / А.В.Ноговицын, С.А.Воробей, С.Н.Илюхин и др. // Тр. Всесоюзной научно-технич. конф. «Задачи технического перевооружения листопрокатного производства». – Днепропетровск, 1987. – С. 17.*
2. *Левченко Г.В., Ноговицын А.В., Воробей С.А. Исследование возможности повышения и стабилизации прочностных свойств горячекатаной широкополосной стали // Металл и литье Украины. – 1996. – №1–2. – С.41–44.*
3. *Прогнозирование процессов структурообразования при охлаждении металлопроката с применением математической модели. / А.В.Ноговицын, А.В.Богачева, М.Ф.Евсюков, Д.В.Лошкарев. // Металлургическая и горнорудная промышленность. –1999. – №5. – С.75–78.*
4. *Математическое описание закономерностей превращения аустенита в изотермических условиях в низкоуглеродистых и низколегированных сталях / А.В.Ноговицын, А.В.Богачева, М.Ф.Евсюков и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. ИЧМ НАН Украины. – Киев: Наукова думка, 1999. – Вып. 3. – С.285–291.*
5. *Оценка адекватности описания математической моделью процесса изменения зерна аустенита горячедеформированной стали / Г.В.Левченко, А.В.Ноговицын, И.А.Вакуленко и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. НАН Украины. – К.: Наукова думка, 2001. – Вып. 4. – С. 263–267.*
6. *Винокур Б.Б., Пилюшенко В.Л., Касаткин О.Г. Структура конструкционной легированной стали. – М.: Металлургия, 1983. – 216 с.*
7. *Флоров В.К., Шубина С.А. Влияние прокатки на формирование аустенитного зерна сталей для трубной заготовки и универсальной полосы // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1977. – № 1. – С.33–35.*
8. *Контролируемая прокатка / В.И.Погоржельский, Д.А.Литовченко, Ю.И.Матросов и др. – М.: Металлургия, 1979. – 184 с.*
9. *Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 564 с.*
10. *Преобразование зерна при первичной рекристаллизации / М.А.Штремель, В.И.Лизунов, В.В.Шкатов и др. // Металловедение и термическая обработка металлов, 1984. – № 6. – С.2–5.*
11. *Дрюкова И.Н., Томенко Ю.С. Кинетика изменения величины зерен аустенита малоуглеродистой стали после деформации при высоких температурах // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1974. – № 4. – С.10–17.*

12. *Sellars C.M., Whiteman J.A.* Recrystallization and grain growth in hot rolling. // *Metal Science.* – 1979. – № 13. – P.187–194.
13. *Liska S., Worniak J.* Matematyczny model pro analzy technologicznych podminek valcovani oceli za tepla // *Hutnicke aktualiti. WHZ.* – V. 22. – № 9. – 1981. – P.1–49.
14. *Моделирование* формирования микроструктуры горячекатаных полос / А.А.Миленин, В.Н.Данченко, А.Ю.Путноки и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2004. – № 6. – С. 42–47.
15. *Прогнозирование* структуры и свойств горячекатаной полосовой стали с применением компьютерного моделирования / А.А.Миленин, А.Ю.Путноки, В.Н.Данченко и др.// *Металл и литье Украины.* – 2006.– № 6. – С.48–53.
16. *Влияние* деформации на измельчение зерна аустенита/ В.И.Балон, Н.Ф.Легейда, В.С.Носов и др.// *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1972.– № 8. – С.76–79.
17. *Оценка* влияния режимов горячей прокатки на полноту процесса рекристаллизации в паузах между деформациями /С.А.Воробей, Г.В.Левченко, С.М.Жучков и др. //Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб.научн.тр. ИЧМ НАН Украины. –2007. –Вып.15. –С.149–155.
18. *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.
19. *Тот Т, Ханак Я.* Влияние величины последнего обжатия на размер зерна горячекатаной углеродистой стали // *Сталь* – 1984. – № 3.– С.62–65.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук, проф. Г.В.Левченко*