

Формирование микротопографии свободной поверхности проката при дрессировке

А. В. Горбунов, В. К. Белов,
О. В. Кривко, Д. О. Беглецов
ОАО “Магнитогорский
металлургический комбинат”,
Магнитогорский государственный
технический университет

Степень передачи микротопографии поверхности рабочих валков на поверхность проката при дрессировке традиционно оценивают по коэффициенту отпечатываемости, который зависит от шероховатости валков и подката, обжата и прочностных свойств металла. Результаты исследований показали, что микротопография холоднокатаного проката в ходе дрессировки формируется и вне очага деформации: при изгибе полосы роликами натяжной станции и обводными с приложением переднего и заднего натяжений. Такое формирование обусловлено образованием кластерных структур на металле и зависит от степени деформации свободной поверхности, размера зерна феррита, прочностных свойств и толщины проката. Так как данные процессы могут привести к увеличению шероховатости поверхности на 20 %, их необходимо учитывать при производстве проката с регламентированной микротопографией.

Авторы провели анализ традиционных методов прогнозирования микротопографии проката после дрессировки, которые учитывают процесс ее форми-

рования в очаге деформации. Также они рассмотрели закономерности изменения микротопографии свободной поверхности и предложили алгоритм его учета вне очага деформации.

Вопросы учета формирования указанной микротопографии рассматривались в работах [1 – 6]. Обычно для проката с регламентированной микротопографией степень передачи (условий формирования) оценивают с помощью коэффициента отпечатываемости (переноса) [7, 8]:

$$Ra_{др} = k_1 Ra_{в} + k_2 Ra_{под}, \quad (1)$$

где $Ra_{др}$, $Ra_{в}$, $Ra_{под}$ — средние арифметические отклонения профилей поверхности полосы после дрессировки, рабочего валка и подката, мкм; k_1 , k_2 — массовые коэффициенты влияния, характеризующие формирование микротопографии рабочих валков дрессировочного стана и подката. Коэффициенты k_1 и k_2 учитывают индивидуальные свойства стана, режим дрессировки, а также прочностные свойства проката.

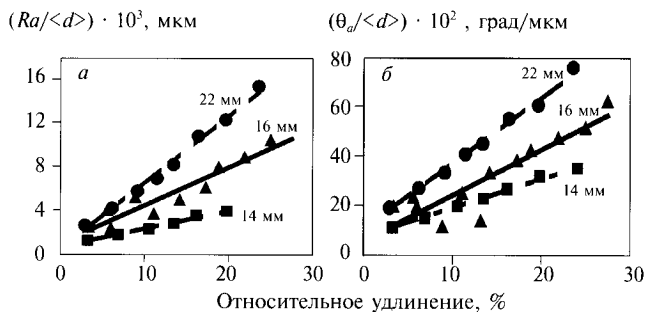


Рис. 1. Зависимость параметров Ra и θ_a от относительного удлинения при разном среднем размере зерна: $a - (Ra/\langle d \rangle) \cdot 10^3 = 0,35\varepsilon + 1,03$, $R^2 = 0,90$; $(Ra/\langle d \rangle) \cdot 10^3 = 0,62\varepsilon + 0,35$, $R^2 = 0,99$; $(Ra/\langle d \rangle) \cdot 10^3 = 0,17\varepsilon + 0,66$, $R^2 = 0,99$; $b - (\theta_a/\langle d \rangle) \cdot 10^2 = 1,85\varepsilon + 6,01$, $R^2 = 0,81$; $(\theta_a/\langle d \rangle) \cdot 10^2 = 2,71\varepsilon + 10,23$, $R^2 = 0,99$; $(\theta_a/\langle d \rangle) \cdot 10^2 = 1,20\varepsilon + 7,44$, $R^2 = 1,00$

Определение данных закономерностей позволяет эффективно решать вопросы обеспечения необходимой микротопографии холоднокатаного проката [7 – 9], требования к которой ужесточаются. Например, требования к параметру Ra автолиста, используемого для штамповки лицевых деталей в ОАО “Автоваз”, находятся в диапазоне от 0,8 до 1,2 мкм [8, 10]. Для выпуска проката с требованиями к микротопографии в узком диапазоне наряду с ее формированием в очаге деформации необходимо учитывать этот фактор вне очага деформации. Возможность нанесения шероховатости

путем протяжки образцов через насеченные ролики показана в работе [11]. Интенсивность переноса шероховатости протяжкой оказалась выше, чем прокаткой, а затраты усилия в 10 раз больше.

Исследования, проведенные в НИЦ “Микротопография”, выявили существование ранее не учтенного механизма — процесса увеличения шероховатости свободной поверхности листа при его одноосной деформации. В работах [12 – 15] показано, что при одноосной деформации параметры профиля свободной поверхности зависят от относительного удлинения ε и от среднего размера зерна феррита $\langle d \rangle$ следующим образом:

$$Ra = \alpha_1 \langle d \rangle \varepsilon + \alpha_2, \quad (2)$$

$$\theta_a = \mu_1 \langle d \rangle \varepsilon + \mu_2, \quad (3)$$

где Ra — среднеарифметическое отклонение профиля, мкм; θ_a — среднеарифметическое отклонение углов наклона микрограней профиля, град; α_1 , α_2 и μ_1 , μ_2 — коэффициенты.

Аналогичные закономерности выполняются и для среднеквадратичных значений R_q и θ_q . На рис. 1 приведены примеры зависимостей (2) и (3), построенных для стали 08Ю. Аналогичные закономерности были определены и для других сталей и сплавов [14, 15].

Шаговые параметры профиля (средний шаг неровности S_m и длина корреляции τ) при увеличении ε остаются неизменными, но их значения существенно зависят

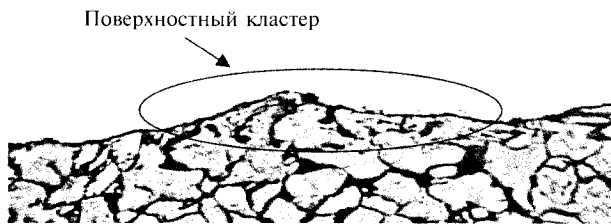


Рис. 2. Вид кластера при металлографическом исследовании свободной поверхности

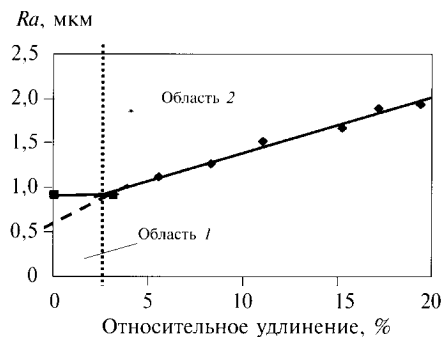


Рис. 3. Зависимость параметров Ra от относительного удлинения при исходной шероховатости поверхности 0,9 мкм для стали 08Ю

от размера $\langle d \rangle$. Интересным оказалось то, что металл с мелкозернистой структурой имел большие значения шаговых параметров, чем с крупнозернистой [14].

Результаты металлографических исследований шлифов, сделанных в поперечном сечении, а также профилей поверхности в продольном сечении полосы показали, что на металле образуются кластеры, содержащие от 3 до 10 зерен в каждом (рис. 2). Следовательно, шероховатость создается за счет образования поверхностных кластеров, и при увеличении одноосной деформации происходит их вспучивание. Размеры кластеров в процессе деформации изменяются только за счет высотных параметров и тангенса угла наклона микрограней профиля. По шаговым параметрам кластеры представляют стабильные образования. С помощью перколяционной модели был смоделирован процесс формирования микротопографии поверхностных кластеров. Благодаря изменению порядка взаимодействия между зернами (влиянию на движение выбранного зерна ближних и соседних зерен) и числа слоев, участвующих в формировании поверхности, было показано, что зависимости (2) и (3) реализуются только в том случае, когда учитывается движение зерен в приповерхностном слое толщиной от $\langle d \rangle$ до $3\langle d \rangle$. Учет движения зерен в слоях толщиной более $3\langle d \rangle$ дает результаты, не соответствующие полученным экспериментальным данным.

Указанные закономерности (2) и (3) выполняются только при условии, что исходная поверхность гладкая. В реальных ситуациях данное условие чаще всего не реализуется. Исследование закономерностей $Ra(\epsilon)$ и $\theta_a(\epsilon)$ в этом случае показало, что параметры Ra и θ_a сохранили линейную зависимость от ϵ , но при малых значениях ϵ имеется прямолинейный участок с $\epsilon < \epsilon_c$,

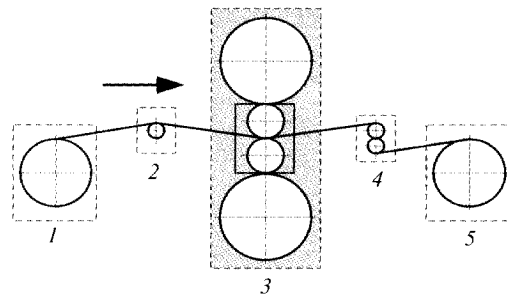


Рис. 4. Зоны формирования микротопографии поверхности при дрессировке: 1 — разматыватель; 2, 4 — зоны формирования микротопографии свободной поверхности; 3 — зона формирования микротопографии поверхности под рабочим инструментом в очаге деформации; 5 — моталка

когда поверхностные кластеры по габаритам меньше выступов исходной шероховатости полосы.

На рис. 3 показана зависимость Ra от ϵ при исходной шероховатости поверхности $R = R_{\text{под}}$, где $R_{\text{под}}$ — среднеарифметическое отклонение профиля подката. Как видно из рис. 3, в области 1 исходная шероховатость скрывает информацию о формировании кластеров, т. е. в диапазоне $\epsilon \approx 0 - 2,5\%$ высота неровностей больше, чем образующихся поверхностных кластеров. Когда высота кластеров становится соизмеримой с размерами неровностей, выполняется линейная зависимость (рис. 3, область 2) параметра Ra от ϵ .

Исходя из сказанного, можно определить величину относительного удлинения начала формирования микротопографии поверхностного слоя ϵ_c :

$$\epsilon_{\bar{R}} = (Ra_{\bar{R}} - \alpha_2) / \alpha_1 < d >; \epsilon_{\bar{\theta}} = (\theta_{\bar{a}} - \mu_2) / \mu_1 < d >. \quad (4)$$

Следовательно, расчетные формулы для $R_{\text{вых}}$ и $\theta_{\text{вых}}$ приобретут вид:

$$\begin{aligned} \text{если } \epsilon < \epsilon_{cR}, \text{ то } R_{\text{вых}} &= R_{\text{вх}}; \\ \text{если } \epsilon > \epsilon_{cR}, \text{ то } R_{\text{вых}} &= \alpha_1 < d > \epsilon + \alpha_2; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{если } \epsilon < \epsilon_{c\theta}, \text{ то } \theta_{\text{вых}} &= \theta_{\text{вх}}; \\ \text{если } \epsilon > \epsilon_{c\theta}, \text{ то } \theta_{\text{вых}} &= \mu_1 < d > \epsilon + \mu_2, \end{aligned} \quad (6)$$

где $R_{\text{вых}}$, $\theta_{\text{вых}}$ — параметры микротопографии после удлинения образцов в ϵ раз.

При дрессировке микротопография свободной поверхности может формироваться за счет приложения натяжения к полосе между клетью и разматывателем, а также между клетью и моталкой при прохождении полосы по обводному ролику и роликam S-образной натяжной станции (рис. 4).

В случае отсутствия роликов в зонах 2 и 4 изменения параметров шероховатости рассчитывают по зависимостям (5) и (6). При прохождении полосы по роликам с приложением переднего и заднего натяжения зависимости (5) и (6) приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{если } \epsilon < \epsilon_c, \text{ то } R_{\text{вых}} &= R_{\text{вх}}; \\ \text{если } \epsilon > \epsilon_c, \text{ то } R &= \alpha_1 H < d > / 2r + \alpha_2; \\ \text{если } \epsilon < \epsilon_c, \text{ то } \theta_{\text{вых}} &= \theta_{\text{вх}}; \end{aligned} \quad (7)$$

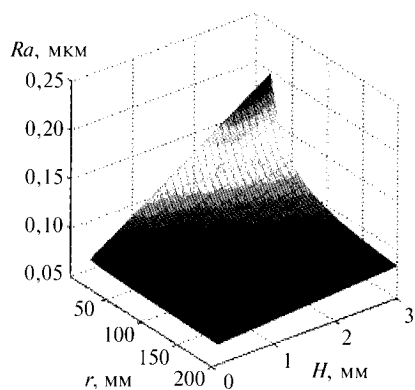


Рис. 5. Зависимость Ra от r и H для проката из стали 08Ю со средним размером зерна $\langle d \rangle = 14$ мкм при $Ra_{\text{тех}} = 0$ мкм

Результаты моделирования изменений микропогографии поверхности в ходе дрессировки*

Этапы	$Ra_{\text{под}}$, мкм	$Ra_{\text{в}}$, мкм	H , мм	$r_{\text{мин}}^p$, мм	$r_{\text{рол}}^p$, мм	$r_{\text{с-рол}}^p$, мм	$Ra_{\text{вых}}$, мкм
А	0,5	2	3	100	200	150	0,75
Б	0,7	2	6	610	100	100	0,87
В	0,7	2	6	610	100	150	0,83
Г	0,7	2	6	610	150	100	0,87
Д	1,2	3	1	610	200	150	1,25

* $r_{\text{max}}^p = 1200$ мм.

$$\text{если } \varepsilon > \varepsilon_c, \text{ то } \theta = \mu_1 H < d > / 2r + \mu_2, \quad (8)$$

где r — радиус ролика, изгибающего полосу, или рулона, который изменяется в пределах от $r_{\text{мин}}^p$ до r_{max}^p ($r_{\text{мин}}^p$, r_{max}^p — внутренний и внешний радиусы рулона); H — толщина дрессируемого металла. Зависимость Ra от r и толщины металла приведена на рис. 5 и показывает возможные изменения Ra при дрессировке полосы толщиной менее 3 мм.

Использование закономерностей (1) и (5) — (8) позволило создать программу, моделирующую изменение параметров шероховатости полосы по длине рулона для разных зон формирования микропогографии в ходе дрессировки (рис. 4). На рис. 6 приведены результаты моделирования с использованием данной программы. Было выявлено, что исследуемый механизм формирования микропогографии полосы на свободной поверхности будет существенным при приложении к полосе натяжения более 250 Н/мм^2 , при ее прохождении по изгибающим роликам радиусом менее 150 мм и толщине дрессируемого проката более 2 мм. На рис. 6 показаны изменения параметра Ra при заданных условиях дрессировки стали 08Ю (таблица). Также можно делать расчеты для параметров R_q , θ_a и θ_c с помощью экспериментально определенных коэффициентов по методике [15].

Заключение

При производстве холоднокатаного проката с регламентированной микропогографией поверхности необходимо учитывать формирование кластерных структур

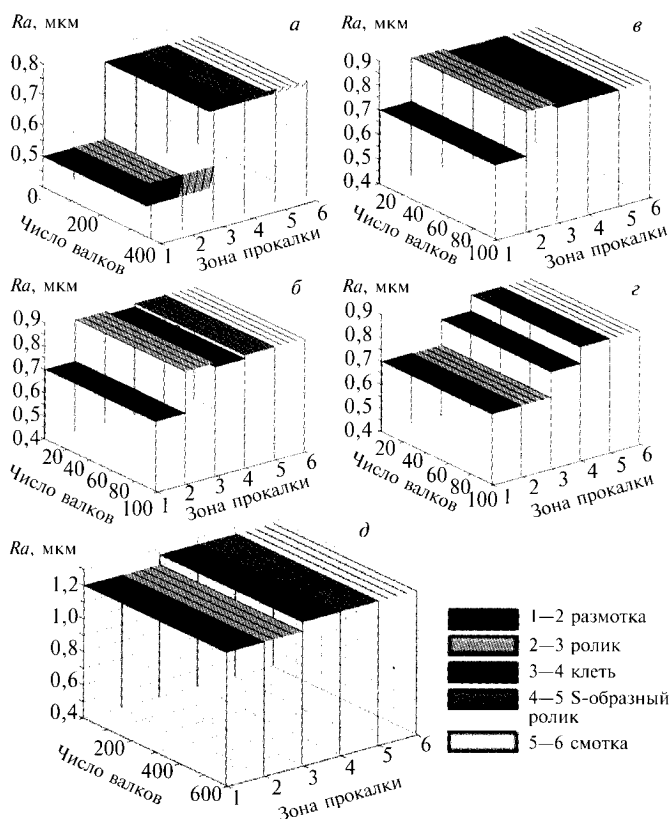


Рис. 6. Изменение микропогографии поверхности проката из стали 08Ю при дрессировке

на свободной поверхности в случаях приложения натяжений к полосе в ходе дрессировки, прохождения полосы по изгибающим роликам стана, дрессировки относительно толстой полосы.

Для каждого стана и вида проката величина вклада формирования кластерных структур на свободной поверхности в общую конечную шероховатость в зависимости от указанных причин будет индивидуальной. Однако предложенная методика не будет претерпевать значительных изменений. Учет рассматриваемого механизма позволяет более точно прогнозировать выпуск холоднокатаного проката в узком диапазоне параметров шероховатости поверхности.

Библиографический список

- Белов В. К. Профили поверхности. — Магнитогорск : МГТУ, 2007. — 260 с.
- Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. — Киев : Техніка, 1982. — 166 с.
- Горбунков С. Г., Долженков А. Ю., Трайно А. И. и др. Формирование микрорельефа поверхности при текстурировании валков и матировании прецизионной полосы // Сталь. 2003. № 1. С. 77 — 79.
- Мазур В. Л., Колесниченко Б. П., Пергамонов Е. А. Энергосиловые параметры процесса дрессировки // Сталь. 1975. № 9.
- Гризер Ф., Вебер Ф., Павельский О. Влияние микрогеометрии поверхности рабочих валков на качество холоднокатаной стальной полосы // Черные металлы. 1984. № 13. С. 11 — 19.
- Шалыпин В. В., Огарков Н. Н. и др. Улучшение качества алюминиевой ленты совершенствованием контроля и формированием рельефа поверхности валков // Прогнозирование и управление качеством металлоизделий, получаемых обработкой

- давлением : материалы всесоюз. науч. конф. — Абакан : 1988. С. 108 — 109.
7. **Бодяев Ю. А., Горбунов А. В., Радионов А. Ф.** и др. Влияние электроэрозивнообработанных рабочих валков дрессировочного стана на микро топографию поверхности проката // *Сталь*. 2006. № 5. С. 90 — 94.
 8. **Бодяев Ю. А., Горбунов А. В., Радионов А. Ф.** и др. Получение автолиста с регламентированной микро топографией поверхности // *Труды Шестого конгресса прокатчиков*. — М. : Черметинформация, 2005. Т. 2. С. 167 — 171.
 9. **Бодяев Ю. А., Горбунов А. В., Радионов А. Ф.** и др. Электроэрозионная подготовка рабочих валков для дрессировки автолиста // *Сталь*. 2007. № 3. С. 52 — 56.
 10. **Горбунов А. В., Злов В. Е., Афанасьев Е. В.** и др. Исследование причин образования дефекта “шагрень” при штамповке холоднокатаного стального листа // *Производство проката*. 2006. № 4. С. 35 — 36.
 11. **Серда Б. П., Прищип Н. И.** Исследование нанесения шероховатости на поверхность полос вне очага деформации // *Наукові праці Запорізької державної Інженерної академії*. *Металургія*. 2006. № 13. С. 87 — 89.
 12. **Белов В. К., Кривко О. В.** Формирование микро топографии свободной поверхности низкоуглеродистой стали при деформации // *Материалы 63-й науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ за 2003 — 2004 гг.* : сб. тр. — Магнитогорск : МГТУ, 2004. Т. 2. С. 165 — 169.
 13. **Кривко О. В., Белов В. К., Губарев Е. В.** Кластерные изменения в поверхности металла при одноосной деформации // *Наука. Технологии. Инновации : материалы всероссийской науч. конф. молодых ученых*. — Новосибирск : НГТУ, 2004. Ч. 1. С. 226 — 227.
 14. **Белов В. К., Кривко О. В., Губарев Е. В.** и др. Изменение функциональных характеристик микро топографии свободной поверхности // *Физические свойства металлов и сплавов* : сб. науч. тр. третьей российской научно-технической конф. — Екатеринбург : УГТУ — УПИ, 2005. С. 282 — 286.
 15. **Белов В. К., Кривко О. В., Губарев Е. В.** и др. Исследование влияния микро структуры стали на формирование микро топографии свободной поверхности при одноосном растяжении // *Физика металлов и металловедение*. 2006. Т. 99. № 6. С. 87 — 93.