

Е. Б. ЛОЖЕЧНИКОВ, д-р техн. наук,
М. В. КУДИН, канд. техн. наук (БНТУ)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПО ТОЛЩИНЕ ПРОКАТА

В прокатном, как и в других обрабатывающих производствах, технологический процесс и используемое оборудование должны обеспечить получение изделий с заданной точностью. Исследованию условий, влияющих на точность прокатываемых изделий, посвящен ряд работ [1–3]. В них описаны результаты измерения продольной разнотолщинности у длинномерных полос и лент, прокатываемых на реверсивном стане из латунных и медных слэбов толщиной 98,5 мм и предварительно прокатанных заготовок. Эксперименты, проводимые в условиях производства в течение нескольких лет, позволили установить, что на условия процесса прокатки влияют разнотолщинность заготовки, изменения температуры проката и валков, продольные напряжения (передний и задний подпор или натяг), условия трения и неточность оборудования (биение валков). В работах [1, 2] описаны результаты экспериментов по продольной прокатке стальных заготовок. Показано, что с увеличением или уменьшением толщины заготовки при неизменном растворе валков толщина проката линейно возрастает или уменьшается. Отмечено увеличение толщины с уменьшением температуры заготовки и повышением ее твердости. В [4] установлена более сложная, нелинейная зависимость разнотолщинности проката от погрешностей размеров исходной заготовки. В [4, 5] анализируется влияние жесткости рабочей клетки на точность проката различных профилей. Там же отмечена нелинейная зависимость упругой деформации рабочей клетки в функции распирающих валки усилий P .

Толщина проката рассматривается как сумма установочного зазора между валками h_0 и упругой деформации рабочей клетки h_y

$$h = h_0 + h_y = h_0 + P / J, \quad (1)$$

где J – коэффициент жесткость рабочей клетки.

В [1, 3] анализируется поэлементно влияние различных факторов технологического процесса и упругой деформации отдельных деталей рабочей клетки на разнотолщинность проката. Зависимости колебания усилий на валки dP от изменения толщин исходной dH и прокатанной dh заготовок, фактического сопротивления деформации $d\sigma_\phi$, колебания натяжения $d\sigma$ и коэффициента трения $d\mu$ выражены в дифференциальном виде

$$dP = \frac{\partial P}{\partial H} dH + \frac{\partial P}{\partial h} dh + \frac{\partial P}{\partial \sigma_\phi} d\sigma_\phi + \frac{\partial P}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial P}{\partial \mu} d\mu. \quad (2)$$

Дифференцированием выражения (1) получена величина продольной разнотолщинности в функции изменения усилия на валки

$$dh = dh_0 + dP / J, \quad (3)$$

которая с учетом всех изменяющихся параметров имеет вид [3, 4]

$$dh = \frac{1}{J + \partial P / \partial h} \left(JdH + \frac{\partial P}{\partial H} dH + \frac{\partial P}{\partial \sigma_\phi} d\sigma_\phi + \frac{\partial P}{\partial \sigma} d\sigma + \frac{\partial P}{\partial \mu} d\mu \right). \quad (4)$$

Такое решение в принципе позволяет выявить влияние различных факторов процесса прокатки на толщину прокатанной полосы и выделить значимые из них, установить связь между общей жесткостью клетки и различными параметрами процесса. Однако в этих работах влияние объективно изменяющихся параметров процесса учитывается коэффициентами, полученными по результатам экспериментов.

Для проведения экспериментов по выявлению влияния разнотолщинности и изменения температуры прокатываемых заготовок использовали литые полосы цинка толщиной 15 мм. Использование в качестве материала образцов цинка обусловлено сравнительно низкими температурами его горячей обработки давлением и сопротивлением пластической деформации [6, 7]. Это позволяет в широких пределах варьировать обжатием за проход и шириной прокатываемых полос. Цинк как материал для проведения экспериментов при исследовании различных вопросов обработки материалов дав-

лением использовали такие известные ученые, как С. И. Губкин, А. И. Целиков, А. А. Бочвар, И. А. Антонов, М. П. Славинский и другие, что позволяет анализировать, обобщать и сопоставлять их результаты с результатами проводимых исследований.

Эксперименты проводили по методу, разработанному И. М. Павловым [8]. Метод заключается в прокатке образцов полос с заостренным в виде клина концом. При постоянном установочном растворе валков прокатка одного такого образца позволяет имитировать прокатку при всех прочих равных условиях большого числа образцов разной толщины.

Для проведения экспериментов использовали литые образцы толщиной $H = 15$ мм, с углом заострения $2\beta = 5^\circ$ при начальной толщине 5 мм (рис. 1). Точки измерения толщин клина фиксировали нанесением параллельных рисок с шагом $t_k = 10$ мм с последующим заполнением их маркерной пастой. Эксперименты проводили с образцами шириной 32; 84 и 174 мм. Нагрев образцов до температуры 160°C осуществляли в камерной электропечи с силитовыми нагревателями. Методом пробных проходов стан настраивали на прокатку за один проход нагретой до 160°C полосы цинка шириной 32 мм с толщины 15 мм до 9 мм. Затем при неизменном растворе валков, частоте вращения валков и условиях смазки (масло индустриальное И20), задавая острым концом в валки, прокатывали клиновые образцы цинка. При этом с ростом обжатия скорость деформации, рассчитываемая по формуле (5) [9], возрастала от нуля до $0,4 \text{ с}^{-1}$

$$u_{\text{ср}} = \frac{v_1}{l_d} \frac{\Delta H}{h}, \quad (5)$$

где v_1 – скорость выхода заготовки из валков.

Измерение толщин прокатанных образцов проводили по сохранившимся, хотя и размытым, маркированным рискам.

Силовой контакт образцов с валками и их обжатие начинались с точки k (рис. 2), расположенной от конца заготовки на расстоянии

$$t_n = n_k t_k + \Delta t_k,$$

где n_k – количество рисок до деформации полосы; Δt_k – расстояние от недеформированной риски до начала деформации образца.

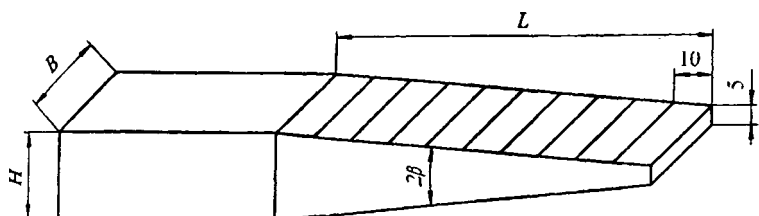


Рис. 1. Схема клинового образца

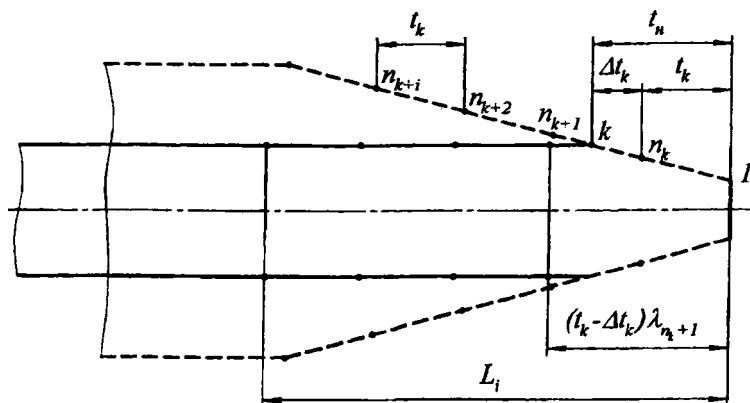


Рис. 2. Схема прокатки клинового образца

Расстояние до последующих i рисок рассчитывали по коэффициенту вытяжки λ_i на участках между рисок

$$L_i = t_n + (t_k - \Delta t_k) \lambda_{n_k + 1} + \sum_{i=n_k}^i \lambda_i t_k. \quad (6)$$

В результате прокатки клиновых образцов получены полосы в основном без «рванин» кромок и других дефектов. На боковых поверхностях участков с повышенным обжатием образовывалисьглаженные следы пересекающихся поверхностей скольжения.

Уширение до $\Delta B \approx 6$ мм наблюдалось при прокатке узких образцов. Следует отметить, что в процессе прокатки раздавался характерный для двойникования треск.

Результаты измерения толщины по длине прокатанных образцов приведены на рис. 3.

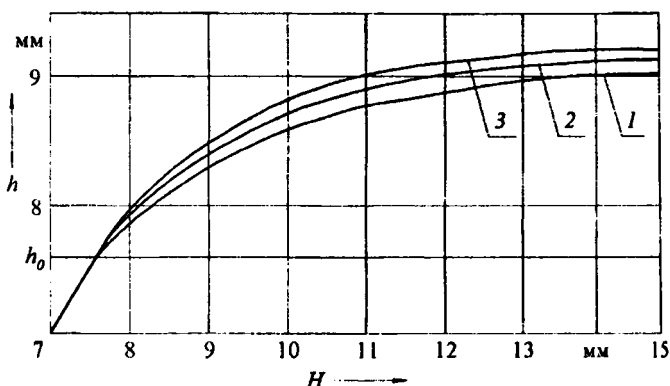


Рис. 3. График зависимости толщины проката h от толщины образца H при ширине образцов B , мм: 1 – 32; 2 – 84; 3 – 178

Из рис. 3 видно, что по мере увеличения их исходных толщин, описываемых функцией $H_i = h_0 + 2L_i \operatorname{tg} \beta$, толщина прокатанных полос нелинейно, с затухающей интенсивностью увеличивается. Отмеченное объясняется нестационарными условиями процесса прокатки, обусловленными переменными обжатиями, а следовательно, переменными углами захвата и площадями контактных с вальками поверхностей.

В процессе прокатки клиновых образцов валки сначала обкатывались по наклонным поверхностям (рис. 4), ликвидируя нарастающим распорным усилием люфты и уплотняя стыки сопрягаемых поверхностей воспринимающих нагрузку деталей рабочей клетки прокатного стана. Фактический захват клиновых образцов валками по достижению установочного зазора h_0 между ними начинался с угла $\beta/2$ (на рис. 4 в точке K). Полный контакт с образцом по дуге захвата $\alpha = \beta$ устанавливался при последующем повороте валков на

угол $\beta/2$. В дальнейшем угол захвата увеличивается в функции роста толщины H_i прокатываемого образца. На основании полученных расчетным путем данных по изложенной в [1, 10] методике построены графики зависимости $\alpha(H)$, $I_d(H)$, $P(H)$, изображенные на рис. 5.

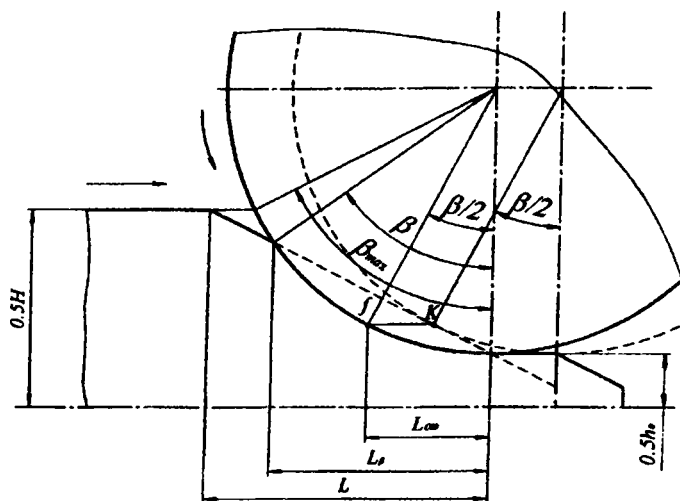


Рис. 4. Схема прокатки клинового образца в валках

Из рис. 5 видно, что с увеличением толщины исходного образца H угол захвата и проекция дуги захвата по направлению прокатки нелинейно возрастают. Следовательно, рост усилия на валки с увеличением обжатия, также нелинейен.

Приняв сопротивление деформации цинка при температуре 150°C [6, 7] $\sigma_t = 51$ МПа, усилия на валки рассчитывали по формуле [1, 9]

$$P = n_\sigma \gamma \sigma_t R B \alpha, \quad (7)$$

где n_σ – коэффициент напряженного состояния; γ – коэффициент, учитывающий влияние меньшего главного напряжения.

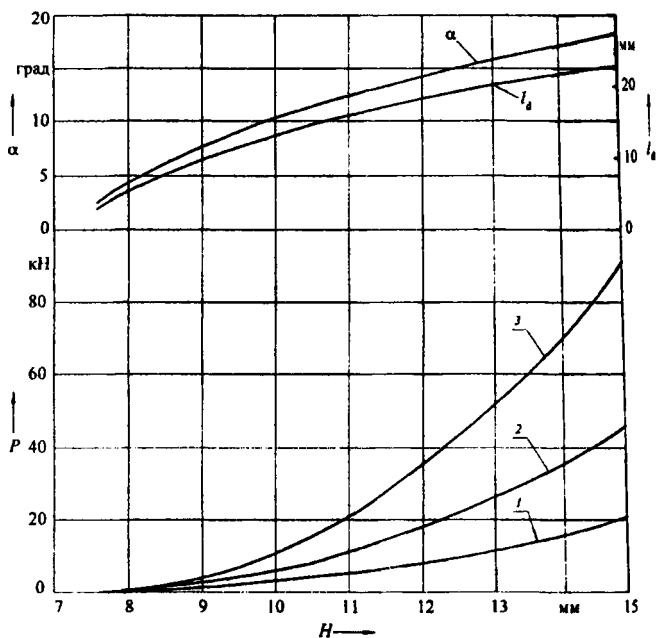


Рис. 5. Зависимости угла захвата α , проекции дуги захвата на направление прокатки l_d и усилий на валки P от переменных толщин образцов H_i шириной B , мм: 1 – 32; 2 – 84; 3 – 178 (α ; $l_d = f(H_i)$ при $B = 32$ мм)

Из рис. 6, показывающего обобщенную для образцов разной ширины зависимость толщины проката от усилий на валки, видно, что с увеличением усилий на валки интенсивность приращения толщины проката уменьшается до значения, близкого к линейному.

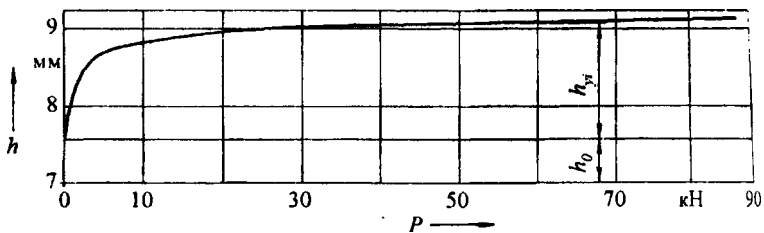


Рис. 6. Зависимость толщины проката от действующих на валки сил

При этом выделяются две области: первая, соответствующая сравнительно малым обжатиям и усилиям на валки, в которой с ростом усилий упругая игра валков h_y возрастает с уменьшающейся интенсивностью, и вторая – с близко к линейной зависимости h_y от P .

Нелинейное, интенсивное изменение толщины прокатанной полосы в функции ее обжатия, а следовательно, и усилий на валки, обусловлено в первой области непостоянством жесткости рабочей клетки прокатного стана, состоящей из большого числа находящихся под технологической нагрузкой имеющих разную жесткость деталей и сопрягаемых поверхностей. Очевидно, что в связи с этим нецелесообразно проводить прокатку в силовом режиме, соответствующем первой области: разнотолщинность исходной заготовки и отклонение от номинальной ее температуры, а следовательно, и сопротивление деформации, обуславливают значительную, трудно предсказуемую в условиях непостоянной жесткости рабочей клетки разнотолщинность прокатанной полосы.

Для прогнозирования точности по толщине прокатанной полосы переменные в пределах технологического допуска входные параметры сведены к двум: количественному – разнотолщинности исходной заготовки $dH = H_{\max} - H_{\min}$ (рис. 7) и качественному – фактическому сопротивлению деформации металла σ , зависящему от его температуры. Из рис. 7 видно, что разнотолщинность исходной заготовки приводит к изменению угла захвата, который при сравнительно малых углах захвата можно выразить через обжатие $\Delta H = H - h$ и радиус валков [1, 9]

$$\alpha = \sqrt{\Delta H / R}. \quad (8)$$

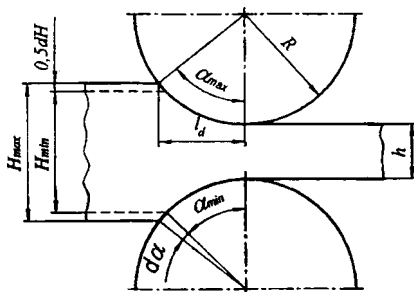


Рис. 7. Схема продольной прокатки полосы

Изменение фактического сопротивления деформации может происходить при изменении напряженно-деформированного состояния материала, которое в условиях продольной прокатки полосы может быть принято постоянным ($n_{\sigma} = 0,8$), а также от изменения температуры металла в очаге деформации из-за неточности и неравномерности нагрева заготовки, ее охлаждения в процессе обработки, деформационного нагрева и других неизбежных, но допускаемых по технологическим условиям факторов. Для учета отклонения температуры dt от номинальной t использовали известную экспоненциальную зависимость механических свойств металлов, в том числе и сопротивления деформации, от температуры [10]

$$\sigma_t = \sigma_{t_0} \exp(n_t \Delta t), \quad (9)$$

где n_t – устанавливаемый экспериментально параметр, для цинка в области температур 60–200 °С равный $n_t = -0,007$ [6, 7].

По результатам проведенных экспериментов и расчетов по (7) с учетом (8) и (9) построены графики зависимости усилий на валки и соответствующей им игры валков от величины обжатия в валках диаметром 200 мм полосы цинка толщиной 10 мм, шириной 100 мм (рис. 8 и 9).

Коэффициент жесткости рабочей клетки определили по результатам экспериментов (рис. 6), воспользовавшись формулой отношения конечных приращений (Коши) [11]

$$J = (P_1 - P_2)/(h_1 - h_2) = \Delta P / \Delta h, \quad (10)$$

где Δh и ΔP – разность толщин прокатанных при $h_0 = \text{const}$ заготовок и соответствующих им усилий на валки. По результатам расчета жесткость рабочей клетки используемого для экспериментов прокатного стана $J = 245$ кН/мм.

Из рис. 8 и 9 видно, что с увеличением обжатия усилия на валки и соответствующее им упругое отжатие валков нелинейно, с уменьшающейся интенсивностью возрастают, что соответствует синусоидальной зависимости площади контакта с прокатываемым материалом от угла захвата. С увеличением температуры прокатываемого материала наследственная разнотолщинность прокатанной полосы уменьшается.

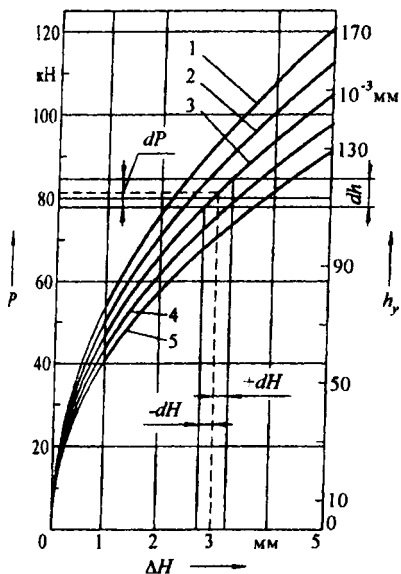


Рис. 8. Зависимость усилия на валки P и их упругого отжатия h_y от абсолютного отжатия полосы цинка толщиной 10 мм, шириной 100 мм при температуре (град.): 1 – 130; 2 – 140; 3 – 150; 4 – 160; 5 – 170

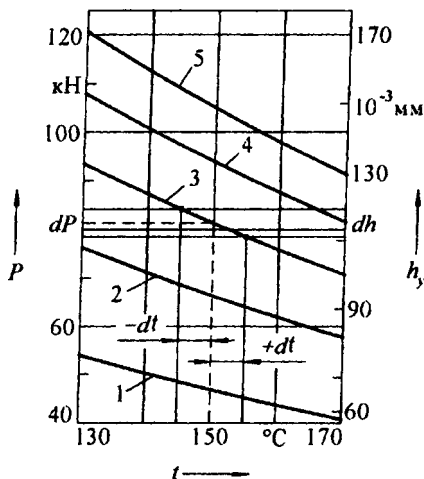


Рис. 9. Зависимость усилия на валки P и их упругого отжатия h_y от температуры прокатываемой полосы цинка толщиной 10 мм, шириной 100 мм при абсолютном отжатии (мм): 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5

Для математического описания этих зависимостей выражение (2) дифференцировали в частных производных, принимая α и σ , переменными [1, 11]

$$dP = \frac{\partial P}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial P}{\partial \sigma} d\sigma. \quad (11)$$

Составляющие полученного дифференциального уравнения находили, дифференцируя (11) по двум переменным α и σ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \alpha} &= n_{\sigma} \gamma b R \sigma t; \\ \frac{\partial P}{\partial \sigma} &= n_{\sigma} \gamma b R \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Полученные дифференциалы подставляли в (11)

$$dP = n_{\sigma} \gamma b R \sigma_t d\alpha + n_{\sigma} \gamma b R \alpha d\sigma. \quad (13)$$

Дифференцируя (8) и (9), определили дифференциалы переменных величин

$$d\alpha = \frac{dH}{2\sqrt{R\Delta H}}; \quad (14)$$

$$d\sigma = n_t \sigma_{t0} e^{n_t \Delta t} dt. \quad (15)$$

Подставив их значения в (13), получили выражение

$$dP = n_{\sigma} \gamma b R \sigma_{t0} \frac{dH}{2\sqrt{R\Delta H}} + n_{\sigma} \gamma b R \alpha n_t \sigma_{t0} e^{n_t \Delta t} dt,$$

преобразованием которого привели к более удобному для использования виду

$$dP = 0,5 \gamma n_{\sigma} b \sigma_{t0} \sqrt{R/\Delta H} (dH + 2n_t \Delta H e^{n_t \Delta t} dt). \quad (16)$$

Выражение (16) представляет математическую модель продольной прокатки, взаимно увязывающую изменение усилия на валки, а следовательно, в соответствии с (3) и наследственную разнотолщинность с отклонением от номинальной толщины (разнотолщинности) исходной заготовки $\pm dH$, ее температуры $\pm dt$ и общего обжатия ΔH . Поскольку графическое изображение фигуры в четырехмерном пространстве трудно воспринимаемо, на рис. 10 и 11 приведены дифференциальные кривые, графически изображающие выражение (16) соответственно при $\Delta t = 0$ и $dH = 0$, т. е. показывающее чувствительность процесса соответственно только к исходной разнотолщинности и только к изменению температуры при разных обжатиях.

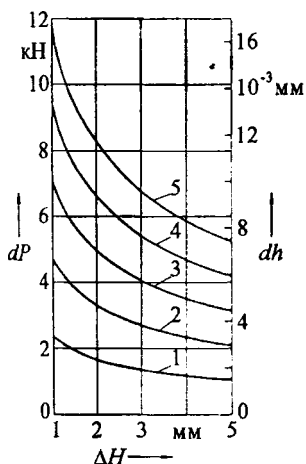


Рис. 10. Зависимость изменения усилий на валки dP и наследственной разнотолщинности dh от величины обжатия ΔH полосы цинка толщиной 10 мм, шириной 100 мм при температуре 150 °С и ее разнотолщинности (мм): 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; 5 – 0,5

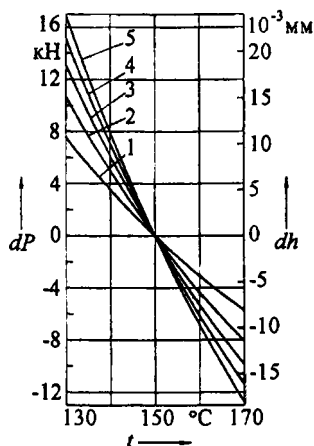


Рис. 11. Зависимость изменения усилий на валки dP и разнотолщинности dh от температуры полосы цинка толщиной 10 мм, шириной 100 мм при абсолютном обжатии (мм): 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5

Анализ полученных результатов показывает, что уменьшение по сравнению с номинальной только толщины исходной заготовки или только ее температуры в большей мере оказывает влияние на наследственную разнотолщинность, чем их увеличение. Однако влияние одновременных отклонений от номинальной толщины исходной заготовки и ее температуры более сложно: наименьшая наследственная разнотолщинность происходит при одновременном либо уменьшении и толщины и температуры, либо при их увеличении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
2. Ларке, Е. К. Прокатка листового и полосового металла / Е. К. Ларке. – М.: Металлургиздат, 1959. – 384 с.
3. Полухин, В. П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станков / В. П. Полухин. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.

4. Чернобривенко, Ю. С. Определение оптимальной жесткости рабочей клетки сортовых станов / Ю. С. Чернобривенко, В. И. Биба // Теоретические проблемы прокатного производства. Теория прокатки: материалы всесоюзн. науч.-техн. конф. – М.: Металлургия, 1975. – С. 416 – 419.

5. Переработка гильз снарядов в тонкополосовой прокат / Л. А. Исаевич, Е. Б. Ложечников, Л. Е. Симонов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 11. – С. 27–29.

6. Вол, А. Е. Цинк и его сплавы. Свойства цинка, его промышленное применение / А. Е. Вол. – М.; Л.: Металлургия, 1933. – 304 с.

7. Бобылев, А. В. Механические и технологические свойства металлов: справочник / А. В. Бобылев. – М.: Металлургия, 1980. – 296 с.

8. Павлов, И. М. Материалы по теории прокатки / И. М. Павлов. – М.: Металлургиздат, 1941. – Т. 3. – 245 с.

9. Теория прокатки: справочник / А. И. Целиков [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

10. Губкин, С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1947. – 531 с.

11. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендлев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.

УДК 621.771.63

Л. А. ИСАЕВИЧ, д-р техн. наук,
Д. М. ИВАНИЦКИЙ, канд. техн. наук,
М. И. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук,
М. М. МАЛЕКИАН (БНТУ)

ПРОКАТКА ПОЛОС ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫМ УШИРЕНИЕМ

Процесс прокатки полос в гладких валках сопровождается явлением уширения, которое в ряде случаев крайне нежелательно. Например, при прокатке заготовок малолистовых рессор с изменяющейся по длине толщиной на их концевых участках наблюдается максимальное уширение, что не допускается конструкцией самого изделия. Для его устранения требуется дополнительная операция – фрезерование, или обрезка концов прокатанной заготовки по ширине.

Расчет уширения основан на принципе наименьшего сопротивления [1]. При прокатке зона очага деформации в плане представляет собой трапецию высотой, соответствующей длине зоны дефор-