

Повышение качества холоднокатаных полос за счет прогнозирования степени использования запаса пластичности

Представлена математическая модель степени использования запаса пластичности деформируемого материала, наиболее полно учитывающая реальный характер развития напряжений и деформаций во времени и соответствующая условиям получения холоднокатаных полос на промышленных станах. Анализ полученных результатов расчета показал целесообразность использования данной математической модели при совершенствовании технологических режимов как собственно процессов прокатки, так и промежуточных отжигов металла. На основе разработанной математической модели можно определить параметры указанных технологических режимов, при которых не возникают микро- и макроскопические разрушения металлопроката.

Ключевые слова: холодная прокатка, степень использования запаса пластичности, разрушение металла, диаграммы пластичности, напряженно-деформированное состояние

Важной задачей при получении холоднокатаных полос на непрерывных и реверсивных станах является совершенствование технологических режимов как собственно процессов прокатки, так и промежуточных отжигов металла, с точки зрения предотвращения образования его микро- и макроскопических разрушений [1, 2]. Решение указанной задачи возможно за счет повышения надежности прогнозирования такого показателя, как степень использования запаса пластичности деформируемого материала [3-5]. При расчете этого показателя необходимо учитывать реальный характер развития напряжений и деформаций во времени, а в качестве исходных использовать данные о напряженно-деформированном состоянии металла, максимально соответствующие условиям холодной прокатки полос на промышленных станах.

Для прогнозирования степени использования запаса пластичности в теории обработки металлов давлением создано несколько методов, наиболее распространенными из которых являются методы В. Л. Колмогорова [2, 5] и В. А. Огородникова [3, 4]. Метод, разработанный В. Л. Колмогоровым, основан на линейной теории накопления повреждений и, как показал сделанный автором работы [4] анализ, не учитывает влияние на скорость их накопления в процессе пластической деформации такого фактора, как история деформирования. Вместе с тем при холодной прокатке полос, относящейся к случаю сложного нагружения, влияние данного фактора существенно и поэтому его необходимо учитывать. Кроме того, количественную оценку степени использования запаса пластичности в рассматриваемом случае нужно осуществлять с учетом объемного напряженного состояния частиц прокатываемого металла, т. е. с учетом третьего инварианта тензора напряжений [4]. Наиболее подходящим для этого является метод, разработанный В. А. Огородниковым, но для его использования необходимо располагать достоверными данными о напряженно-деформированном состоянии

материала, соответствующими реальным условиям холодной прокатки полос на промышленных станах.

Целью работы является дальнейшее развитие методов прогнозирования степени использования запаса пластичности деформируемого металла, что позволит повысить качество и снизить отсортировку холоднокатаных полос по дефектам сплошности.

Согласно рекомендациям авторов работы [6] для получения данных о напряженно-деформированном состоянии металла, подвергаемого холодной прокатке, воспользовались методом конечных разностей. Указанный метод относительно прост, по сравнению с методом конечных элементов, требует значительно меньших затрат машинного времени на численную реализацию соответствующего алгоритма расчета и вместе с тем позволяет наиболее полно учесть реальный характер распределений по длине очага деформации его геометрических параметров, механических свойств деформируемого материала, а также условий внешнего контактного трения.

Согласно методу конечных разностей интегральный очаг деформации (рис. 1, а), состоящий из зон пластического формоизменения и упругого восстановления длинами $L_{\text{пл}}$ и $L_{\text{уп}}$ соответственно, разбивали с шагом Δx_i на конечное множество n i -ых элементарных объемов (рис. 1, б), для каждого из которых положение начального и конечного граничных сечений (сечения ae и cd на рис. 1, б) определяли геометрическими координатами x_{i1} и x_{i2} . Значения высот h_{xi1} и h_{xi2} этих сечений устанавливали на основе подхода И. Я. Штаермана [2, 6] к учету упругих деформаций валков и полосы, а при расчете скоростей V_{xi1} и V_{xi2} продольного перемещения частиц прокатываемого металла (рис. 1, б) исходили из гипотезы скольжения теории продольной прокатки. Согласно данной гипотезе зону пластического формоизменения разделили на зоны отставания и опережения длинами $L_{\text{от}}$ и $L_{\text{оп}}$ соответственно (рис. 1, а), а толщину h_n полосы в нейтральном сечении очага деформации определяли с учетом влияния напряжений заднего σ_0 и переднего

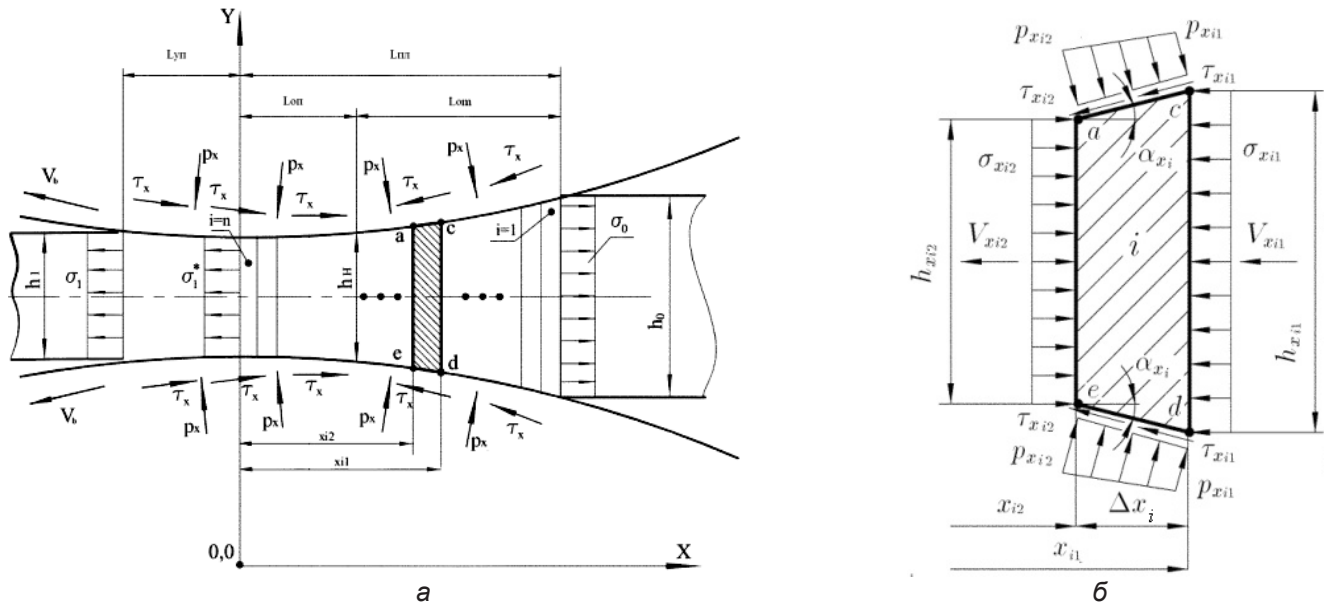


Рис. 1. Расчетные схемы интегрального очага деформации (а) и выделенного i -го элементарного объема зоны пластического формоизменения (б): σ_1^* – нормальное осевое напряжение, действующее на границе зон пластического формоизменения и упругого восстановления; α_{xi} – угол контакта i -го элементарного объема с валками

σ_1 натяжений, окружной скорости валков V_b , а также толщины раската до h_0 и после h_1 пропуска. Для аналитического описания касательных контактных напряжений τ_{xi1} и τ_{xi2} (рис. 1, б) по аналогии с авторами работы [6] использовали закон А. Н. Леванова. Непосредственное определение показателей напряженно-деформированного состояния металла осуществляли в направлении прокатки по рекуррентной схеме [2], согласно которой результаты расчета предыдущего элементарного объема использовались в качестве исходных данных для расчета последующего элементарного объема. При этом нормальные контактные p_{xi1} и нормальные осевые σ_{xi1} напряжения (рис. 1, б), которые соответствуют начальному граничному сечению 1-го элементарного объема, выделенного в зоне пластического формоизменения, известны и равны 0 и $-\sigma_0$ соответственно. При расчете нормальных контактных p_{xi2} и нормальных осевых σ_{xi2} напряжений (рис. 1, б), соответствующих конечному граничному сечению выделенного i -го элементарного объема, по аналогии с авторами работы [2] воспользовались условиями пластичности и статико-динамического равновесия, в результате чего получили уравнения [6]:

$$p_{xi2} = \left\{ 2 \left[\sigma_{xi1} h_{xi1} + 2K_{tuxi2} a_{fxi2} h_{xi2} + (\tau_{xi1} + \tau_{xi2}) \Delta x_i \right] + p_{xi1} (h_{xi1} - h_{xi2}) - \rho_M (h_{xi1} + h_{xi2}) \Delta x_i (V_{xi2}^2 - V_{xi1}^2) / (2\Delta x_i) \right\} (h_{xi1} + h_{xi2}); \quad (1)$$

$$\sigma_{xi2} = p_{xi2} - 2K_{tuxi2} a_{fxi2}, \quad (2)$$

где $2K_{tuxi2}$ – показатель удвоенного сопротивления металла сдвигу, определенный с учетом влияния температуры и скорости холодной прокатки; a_{fxi2} – пока-

затель, учитывающий условия внешнего контактного трения; ρ_M – показатель плотности материала прокатываемой полосы.

По результатам расчета, полученным согласно формулам (1) и (2), определяли степень использования запаса пластичности холоднокатаных полос. Для этого воспользовались методом В. А. Огородникова [3, 4], позволяющим наиболее полно учесть реальный характер развития напряжений и деформаций во времени. В соответствии с данным методом и с учетом принятого допущения о двухмерном характере пластического формоизменения прокатываемой полосы расчет текущих ψ_{xi2} и результирующих ψ_1 значений степени использования запаса пластичности производили на основе алгоритмической последовательности вида:

$$\begin{aligned} \sigma_{1xi2} &= -\sigma_{xi2}, \\ \sigma_{2xi2} &= -(\sigma_{xi2} + p_{xi2}) / 2, \\ \sigma_{3xi2} &= -p_{xi2}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\eta_{xi2} = \sqrt{3} (\sigma_{1xi2} + \sigma_{3xi2}) / (\sigma_{1xi2} - \sigma_{3xi2}); \quad (4)$$

$$\Delta \eta_{xi} = \eta_{xi2} - \eta_{xi1}; \quad (5)$$

$$\Delta \varepsilon_{ixi} = (2 / \sqrt{3}) \ln (h_{xi1} / h_{xi2}); \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ixi2} = \sum_i \Delta \varepsilon_{ixi} = (2 / \sqrt{3}) \ln (h_0 / h_{xi2}); \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \psi_{xi2} &= \sum_i \left[1 + a_{\psi} \arctg (\Delta \eta_{xi} / \Delta \varepsilon_{ixi}) \right] \times \\ &\times \frac{\varepsilon_{ixi2}}{\varepsilon_{ixi2}^*} \frac{a_{\psi} \arctg (\Delta \eta_{xi} / \Delta \varepsilon_{ixi})}{\left[1 + a_{\psi} \arctg (\Delta \eta_{xi} / \Delta \varepsilon_{ixi}) \right]} \Delta \varepsilon_{ixi}; \end{aligned} \quad (8)$$

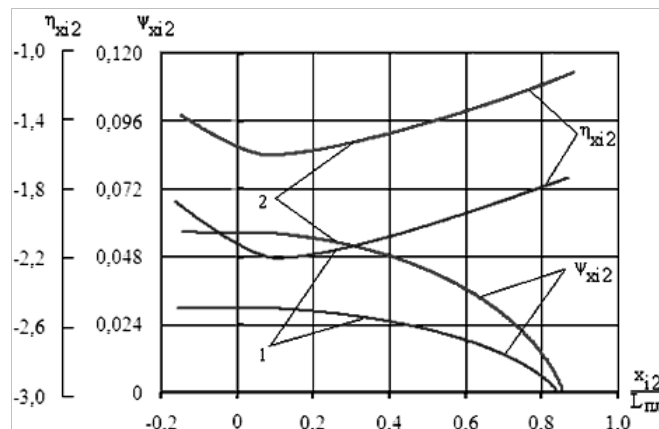
$$\Psi_1 = \Psi_0 + \Psi_{xi2} \Big|_{x_{i2}=L_{пл}}, \quad (9)$$

где σ_{1xi2} , σ_{2xi2} , σ_{3xi2} – текущие значения главных нормальных напряжений, за положительные значения которых приняты напряжения растяжения; η_{xi2} и $\Delta\eta_{xi}$ – соответственно текущее значение показателя напряженного состояния металла и приращение данного показателя, возникающее при переходе от начального к конечному граничному сечению выделенного i -го элементарного объема; ε_{ixi2} и $\Delta\varepsilon_{ixi}$ – соответственно текущее значение показателя интенсивности деформации металла и приращение данного показателя, возникающее при переходе от начального к конечному граничному сечению выделенного i -го элементарного объема; a_v – коэффициент регрессии, равный 0,215 [4]; ε_{ixi2}^* – максимально допустимое с точки зрения разрушения данного металла текущее значение интенсивности деформации, которое определяется с учетом третьего инварианта тензора напряжений по методу, изложенному в работе [4]; Ψ_0 и $\Psi_{xi2} \Big|_{x_{i2}=L_{пл}}$ – соответственно степень использования запаса пластичности металла до пропуска и в конце зоны пластического формоизменения, то есть при $x_{i2} = L_{пл}$.

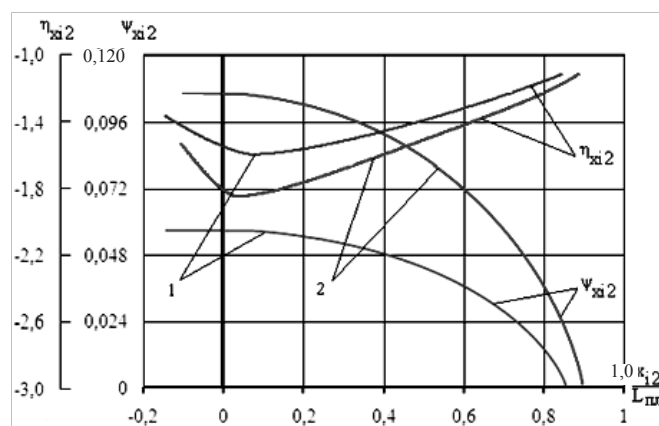
Следует отметить, что при $\Psi_1 \geq 1$ сплошность материала нарушается, и, следовательно, режим холодной прокатки полос необходимо откорректировать. В случаях, когда Ψ_1 незначительно меньше единицы, целесообразно назначать промежуточную термическую обработку металла. В качестве примеров численной реализации алгоритмической последовательности (3-9) на рис. 2 представлены распределения по длине зоны пластического формоизменения $L_{пл}$ показателя напряженного состояния η_{xi2} и степени использования запаса пластичности Ψ_{xi2} . Расчетные данные получены применительно к холодной прокатке в валках радиусом $R = 250$ мм со скоростью $V_1 = 5$ м/с отожженной полосы ($\Psi_0 = 0$) из стали 08 кп, исходная толщина которой $h_0 = 2,0$ мм, а ширина $B = 1200$ мм. Выполненный анализ показал, что степень использования запаса пластичности Ψ_{xi2} с увеличением напряжений σ_0 и σ_1 натяжения (рис. 2, а), а также показателя ε степени обжатия полосы (рис. 2, б) возрастает, а с увеличением коэффициента f внешнего контактного трения (рис. 2, в), наоборот, снижается. Это хорошо согласуется с практическими данными, поэтому показатель Ψ_{xi2} можно использовать в качестве критерия при оценке оптимальности режима деформации, разработанного с точки зрения предотвращения микро- и макроскопических разрушений металлопроката, что особенно актуально в случае холодной прокатки цветных металлов и сплавов.

Выводы

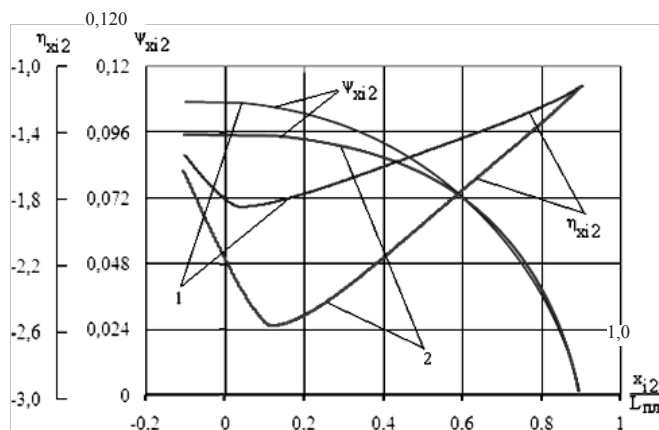
В работе получил дальнейшее развитие метод прогнозирования степени использования запаса пластичности деформируемого материала, отличающийся тем, что применительно к условиям холодной прокатки полос, позволяет учесть влияние таких факторов, как история деформирования и третий ин-



а



б



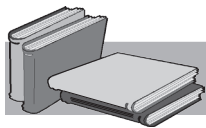
в

Рис. 2. Расчетные распределения по длине зоны пластического формоизменения показателя напряженного состояния и степени использования запаса пластичности: 1 – $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$; 2 – $\sigma_0 = \sigma_1 = 50$ МПа (а), 1 – $\varepsilon = 0,1$; 2 – $\varepsilon = 0,2$ (б), 1 – $f = 0,05$; 2 – $f = 0,08$ (в)

вариант тензора напряжений. Кроме того, достоинствами метода являются его относительная простота и быстрота численной реализации, а также возможность определения показателей напряженно-деформированного состояния металла с учетом реальных распределений по длине очага деформации его геометрических параметров, механических свойств

прокатываемого материала, а также условий внешнего контактного трения. Усовершенствованный метод позволяет повысить надежность прогнозирования степени использования запаса пластичности и

на этой основе определить такие условия процесса деформации, которые обеспечивают повышение качества и, как следствие, снижение отсортировки хо-



ЛИТЕРАТУРА

1. Шаталов Р. Л. Управление показателями качества и деформируемостью полос при прокатке / Р. Л. Шаталов // Сталь. – 2004. – № 9. – С. 31-34.
2. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос: монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск: ДГМА, 2010. – 244 с.
3. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы): монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак // УНІВЕРСУМ. – Вінниця, 2005. – 204 с.
4. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.
5. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
6. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния тонких полос при прокатке / А. В. Сатонин, С. С. Настоящая, В. А. Переходченко, А. Г. Присяжный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Машиностроение, материаловедение: Сб. научн. трудов. – Пермь: Из-во «ПНИПУ», 2012. – Т. 14. – № 4. – С. 15-23.

Анотація

Присяжный А. Г.

Підвищення якості холоднокатаних полос за рахунок прогнозування ступеня використання запасу пластичності

Представлена математична модель ступеня використання запасу пластичності деформованого матеріалу, що найповніше враховує реальний характер розвитку напружень і деформацій в часі та відповідає умовам отримання холоднокатаних штаб на промислових станах. Аналіз отриманих результатів розрахунку показав доцільність використання даної математичної моделі при вдосконаленні технологічних режимів як власне процесів прокатування, так і проміжного відпалу металу. На основі розробленої математичної моделі можна визначити параметри вказаних технологічних режимів, при яких не виникають мікро- та макроскопічні руйнування металопрокату.

Ключові слова

холодне прокатування, ступінь використання запасу пластичності, руйнування металу, діаграми пластичності, напружено-деформований стан

Summary

Prysiazhnyi A. G.

Cold rolling improving at the expense of usage degree prediction of reserve plasticity

In the article a mathematical model for determination of damaging of material is presented. A mathematical model takes into account the real character of development of tensions and deformations in time and corresponds to conditions of the cold rolling of thin strips. The analysis of results of calculation confirmed expedience of the use of mathematical model at perfection of processes of rolling and intermediate annealing of metal. A mathematical model allows define conditions, which do not give result in destruction of material.

Keywords

cold rolling, usage degree of reserve plasticity, damaging of metal, diagram of plasticity, tense and deformed state

Поступила 21.04.14