

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО СЕЧЕНИЮ РАСКАТА ПРИ ПРОКАТКЕ ВЫСОКИХ ПОЛОС

Ершов С.В., Левченко Г.В., Головки Д.С. (ДГТУ, г. Днепропетровск)

Рассмотрены вопросы определения прорабатываемости металла при прокатке и вида математических уравнений, обеспечивающих достоверное описание распределения степени сдвиговой деформации в очаге деформации

Введение.

При производстве некоторых видов крупносортового проката, например осей железнодорожных вагонов, требованиями стандарта предусмотрен жесткий контроль за качеством внутренней структуры изделия. Контроль за этим качеством осуществляется, как правило, с использованием ультразвуковых дефектоскопов, которые чувствительны практически ко всем видам несовершенств внутренней структуры. В частности, при наличии в структуре изделия отдельных участков с грубозернистой структурой с балом зерна 5 и менее в производственных условиях наблюдается повышенное затухание ультразвукового сигнала, что становится причиной дополнительных дорогостоящих нормализаций или приводит к окончательному браку всего изделия.

Одним из способов воздействия на качество внутренней структуры проката является использование специально разработанных режимов деформации.

Состояние вопроса, постановка задачи и цель работы.

Вопросами исследования влияния режимов деформации на проработку структуры готовых изделий занимались многие коллективы ученых. Здесь можно отметить работы таких ученых в области прокатного производства, как А.П.Чекмарев, И.Я.Гарновский, а в области ковочного производства – М.Я. Дзугутов, В.А. Тюрин и их последователи.

Особенностью работ этих авторов был экспериментальный подход к изучению прорабатываемости как в лабораторных, так и в производственных условиях. Основным выводом который можно сделать по результатам этих исследований заключается в том, что интенсификация режимов деформации практически всегда положительно сказывается на проработке внутренних участков деформируемых изделий [1].

При этом показано, что деформация распределяется неравномерно по высоте и ширине раската [2, стр. 51- 62]. По высоте деформация имеет

большую величину в поверхностных и меньшую величину в центральных слоях. По ширине полосы деформация в поверхностных слоях меньше по середине ширины раската и больше в крайних его участках. По ширине в центральной области деформация больше в среднем по ширине участке и меньше у боковой поверхности полосы.

Кроме этого работы В.А. Тюрина, работа А.Б. Найзабекова [3], а также монография М.Я. Дзугутова [4] показали, что к усиленной проработке структуры может привести создание специальных условий деформации, когда в обрабатываемой заготовке будет обеспечена сдвиговая деформация.

Все приведенные данные объединяет один общий недостаток. Он состоит в том, что все эти данные получены в виде общих рассуждений или рекомендаций, но без математической формализации наблюдаемых явлений. Однако при разработке конкретных режимов деформации общих рассуждений о характере распределения деформации недостаточно. Нужно иметь четкие данные о том, какая величина деформации будет присутствовать в том или ином участке раската, как достичь необходимую для проработки степень деформации, какое необходимо обжатие в каждом конкретном проходе и калибре.

Для этого необходимы математические зависимости в виде формул или математические модели в виде программных комплексов, которые будут адекватно описывать распределение деформации при прокатке в зависимости от основных технологических факторов. Получение таких зависимостей экспериментальным способом очень дорого и трудоемко. При этом использование современных численных методов значительно облегчает задачу при условии правильности описания деформированного состояния и, в частности, описания распределения степени деформации по очагу деформации.

Поэтому было решено выполнить проверку разработанного на кафедре ДГТУ комплекса программного обеспечения ESV Deform для расчета напряженно-деформированного состояния при прокатке высоких полос с целью оценки адекватности расчета распределения деформации по сечению раската и определения вида зависимостей, которые обеспечивают достоверное описание распределения степени сдвиговой деформации в очаге деформации.

Методика теоретических исследований.

Для расчета распределения деформации в объеме заготовки 290 x 290 применили современный численный метод решения деформационных задач с использованием теории пластичности.

Использовали метод конечных элементов, который позволяет найти решение деформационной задачи в вариационной постановке. Для этого используется вариационное уравнение

$$\delta \left[\frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV - \int_S \sigma_\tau v_\tau dS + t_1 \int_V \epsilon_0^2 dV + t_2 \int_S (v_n - \omega_n)^2 dS \right] = 0,$$

где μ - условная вязкость металла ($\mu = \frac{\tau_s}{H_{it-1}} = \frac{\tau_s}{1.0}$); H - интенсивность скоростей деформации сдвига; σ_τ и v_τ - полное напряжение трения и скорость скольжения металла по поверхности инструмента S ; t_1 - штрафная константа на невыполнение условия несжимаемости; $\epsilon_0 = \frac{1}{3}(\xi_x + \xi_y + \xi_z)$ - скорость относительного изменения объема; t_2 - штрафная константа на невыполнение условия непроницаемости; v_n - проекция скорости течения металла в данной точке контактной поверхности на нормаль к поверхности в этой точке; ω_n - проекция скорости движения инструмента на нормаль к поверхности контакта в данной точке.

Моделирование выполнено для условий горячей прокатки при температуре полосы 1100°C . Валки имели диаметр 1100 мм. Частота вращения валков равна 80 об/мин. Обжатие $\Delta h = 80$ мм. Исходная высота полосы h_0 равна 670 мм.

Степень сдвиговой деформации Λ оценивали с использованием выражения, предложенного в монографии В.Л. Колмогорова [5]

$$\Lambda = \int_{\tau_0}^{\tau_1} H d\tau,$$

где τ_0, τ_1 - время начала и окончания деформации.

Решение об использовании сдвиговой степени деформации для оценки прорабатываемости структуры было принято по той причине, что в соответствии с ранее приведенными результатами именно сдвиговая деформация приводит к существенному увеличению прорабатываемости металла.

Анализ полученных результатов.

В результате выполнения расчетов получено трехмерное поле скоростей, которое позволило вычислить степень сдвиговой деформации в каждой точке исследуемого раската. Была рассчитана степень деформации в логарифмическом виде и в процентном отношении.

Результаты расчета приведены на рис. 1.

Рисунок показывает, что сдвиговая деформация распределена по сечению раската очень неравномерно. Характер распределения деформации соответствует описанным ранее представлениям, полученным в результате экспериментальных исследований.

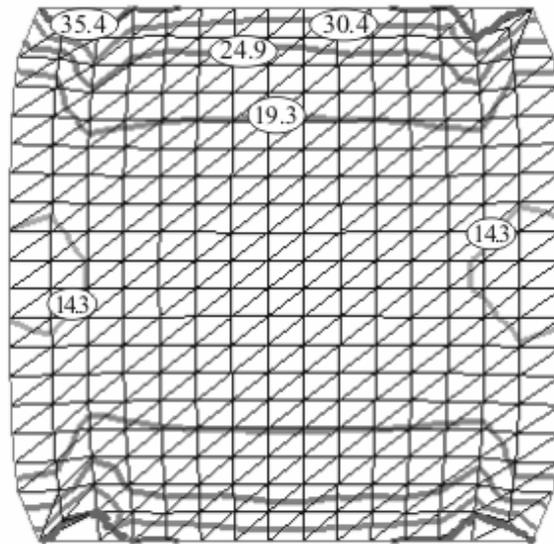


Рисунок 1 – Изолинии степени сдвиговой деформации в процентах

На следующем этапе исследования решался вопрос о виде математической зависимости распределения сдвиговой деформации, так как использование упрощенных зависимостей хотя и позволяет правильно оценить распределение деформации по сечению, но снижает точность вычислений за счет сглаживания кривых в месте наиболее неравномерного деформирования. Это может сказаться на принятии решения о применимости той или иной схемы деформации для улучшения проработки структуры металла.

Для ответа на поставленный вопрос были построены зависимости распределения степени сдвиговой деформации по высоте и по ширине раската вдоль вертикальной и горизонтальной осей симметрии. Выбор горизонтального расположения вдоль оси симметрии обусловлен необходимостью оценки проработки металла в тех местах, к которым деформация проникает в наименьшей степени. Результаты построений приведены на рис. 2.

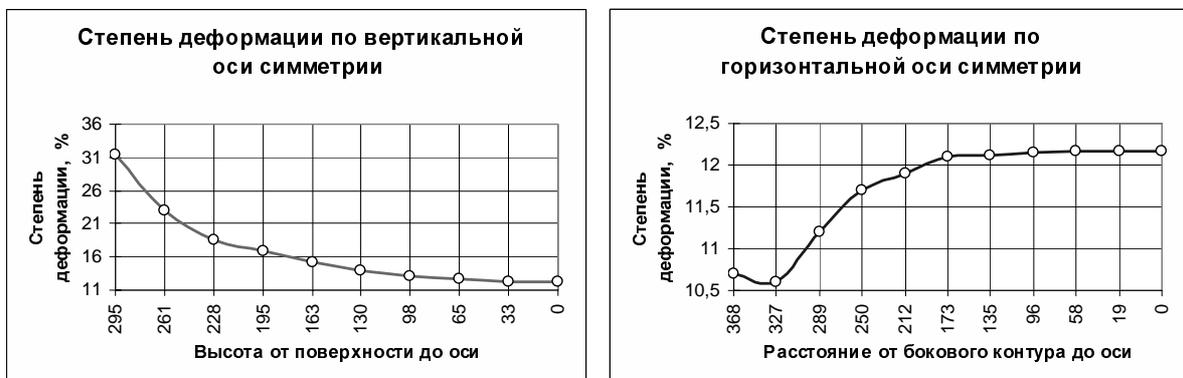


Рисунок 2 – Распределение сдвиговой степени деформации

Рисунок показывает, что более сложным образом деформация изменяется по ширине полосы, чем по высоте. Хорошо видно, что в области,

расположенной рядом с боковой поверхностью, имеется зона с локальным минимумом. Следует отметить, что ранее полученные экспериментальные результаты говорили о том, что более сложным образом изменяется степень деформации по вертикальной оси симметрии. Такой вывод мог быть сделан ввиду ограниченной точности экспериментального метода изучения деформации с помощью винтов или пластин.

Для возможности использования результатов исследований по обрабатываемости металла при различных схемах деформации приведенные результаты должны быть преобразованы в логарифмическую форму, которая позволяет суммировать степень деформации в отдельных участках полосы при многопроходной прокатке. Результаты данного расчета и их регрессионной обработки приведены на рис. 3.

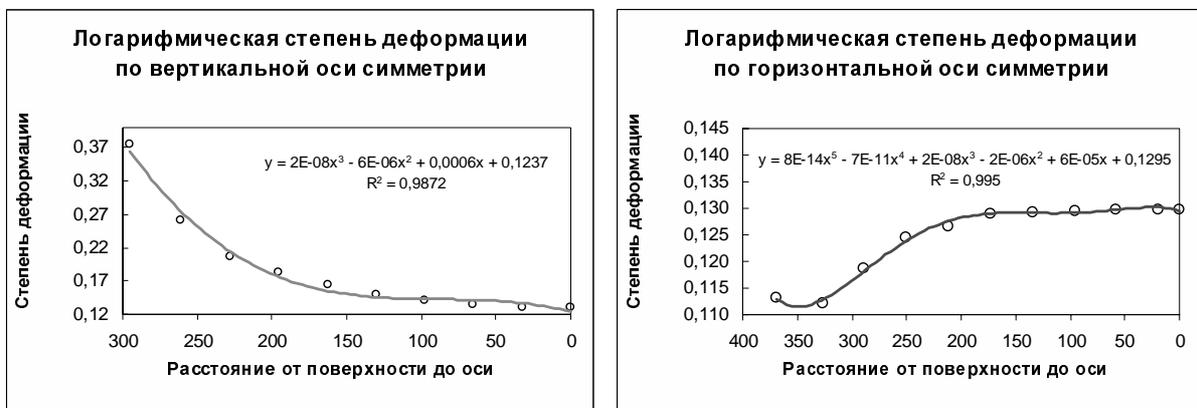


Рисунок 3 – Логарифмическая степень деформации и регрессионные уравнения

Анализ приведенного рисунка показывает, что логарифмическая степень деформации по высоте сечения наиболее точно (коэффициент корреляции 0.99) аппроксимируется полиномом 3 степени. По ширине сечения наиболее точные результаты (коэффициент корреляции 0.995) получены при использовании полинома 5 степени.

Для сравнения приведем те же результаты, но при их аппроксимации полиномами 2 степени. Результаты данной аппроксимации представлены на рис. 4.

Из рисунка хорошо видно, что при высоком уровне значимости полученных зависимостей (коэффициент корреляции 0,95) при описании распределения степени деформации по высоте сечения получаем в области оси симметрии (координата 0) увеличение степени деформации. Это при том, что расчетные данные четко показывают, что степень деформации не увеличивается, а всегда уменьшается по мере приближения к центральным участкам полосы. Во втором случае при описании распределения степени деформации по ширине полосы полученная регрессионная зависимость

сгладила локальный минимум степени деформации в области боковой поверхности полосы.

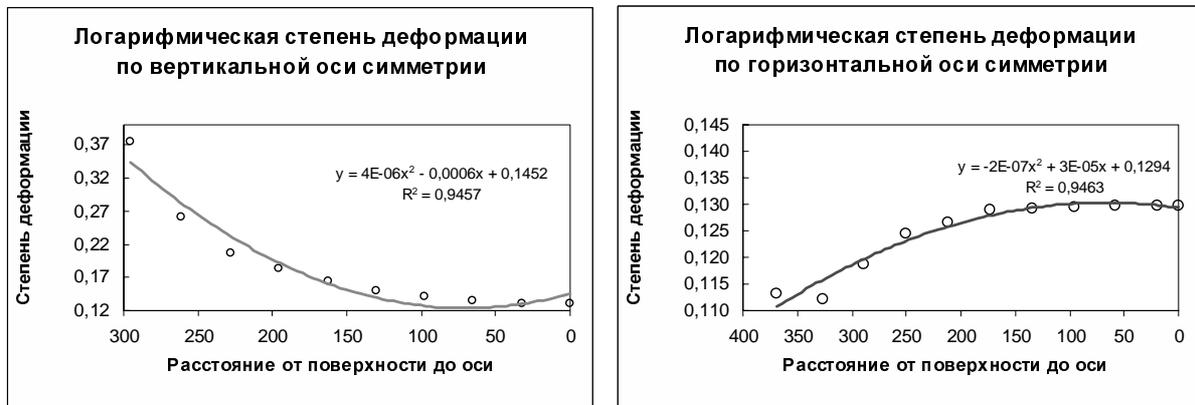


Рисунок 4 – Логарифмическая степень деформации и квадратичные регрессионные уравнения

С точки зрения оценки величины проработки описанные недостатки могут быть несущественны, но при условии, если эти зависимости используются только с практической точки зрения для оценки величины проработки. В случае использования этих зависимостей для теоретического анализа процессов деформирования и особенно при прокатке в калибрах, такие результаты аппроксимации могут быть причиной неверной интерпретации явлений, происходящих в очаге деформации. Кроме этого, сглаживание локального минимума может стать причиной завышенного значения теоретической степени проработки в описанном месте полосы, а это, в свою очередь, может повлиять на принятие практических решений по коррекции схемы деформации.

Выводы.

1. Сопоставление результатов расчета степени сдвиговой деформации с результатами экспериментальных исследований показало их полную идентичность. Это дает возможность использовать разработанный программный комплекс для оценки прорабатываемости металла при прокатке.

2. Установлено, что распределение деформации по ширине полосы является более неравномерным, чем по ее высоте. Это показывает, что при анализе реального распределения деформации недопустимо упрощение алгоритма определения деформированного состояния в очаге деформации. В противном случае исследователь лишается возможности учесть локальные эффекты, сопутствующие сложному течению металла.

3. При описании распределения степени деформации при прокатке в гладких валках лучшие результаты аппроксимации сдвиговой степени деформации, исключаящие неверное толкование наблюдаемых явлений, по высоте полосы дает использование полиномов 3 степени, а по ширине полосы – полиномов 5 степени.

Литература

1. Чекмарев А. П. Интенсификация режима обжатий на блюминге / А. П. Чекмарев, В. Л. Павлов, В. М. Клименко [и др.] // *Сталь*. - 1955. - № 10. - С. 916-921.
2. Теория прокатки крупных слитков / А. П. Чекмарев, В. Л. Павлов, В. И. Мелешико, В. А. Токарев. – М.: *Металлургия*, 1968. – 252 с.
3. Найзабеков А. Б. Роль сдвиговых деформаций в закрытии внутренних дефектов / А. Б. Найзабеков, Ж. А. Ашкеев, С. Н. Лежнев // *Известия вузов ЧМ* - 1999. - № 10. - С. 20-22.
4. Дзугутов Я. М. Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением: 2-е изд. / Я. М. Дзугутов. – М.: *Металлургия*, 1974. – 280 с.
5. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов / В. Л. Колмогоров. - М.: *Металлургия*, 1986. - 688 с.

© Ершов С.В., Левченко Г.В., Головки Д.С. 2008