

$$m_p = \frac{d_{ш}^{эу} \cdot u^{эу} \cdot (u^{\delta} + 1) \cdot \cos \beta^{\delta}}{d_{ш}^{\delta} \cdot u^{\delta} \cdot (u^{эу} + 1) \cdot \cos \beta^{эу}} =$$

$$= \frac{0,1 \cdot 2 \cdot (5,96 + 1) \cdot \cos 30}{0,4 \cdot 5,96 \cdot (2 + 1) \cdot \cos 22,6} = 0,19.$$

Тогда масштабный коэффициент суммарной скорости качения

$$m_{U_{\Sigma}} = \left(\frac{m_{qH}^{0,15}}{m_p^{0,4}} \right)^{\frac{1}{0,75}} \left(\frac{0,41^{0,15}}{0,19^{0,4}} \right)^{\frac{1}{0,75}} = 1,97.$$

Суммарная скорость качения в полюсе зацепления

$$U_{\Sigma} = d_{ш} \cdot \omega_{ш} \cdot \sin \alpha;$$

$$m_{U_{\Sigma}} = \frac{d_{ш}^{эу} \cdot \omega_{ш}^{эу}}{d_{ш}^{\delta} \cdot \omega_{ш}^{\delta}}.$$

Тогда

$$\omega_{ш}^{эу} = m_{U_{\Sigma}} \frac{d_{ш}^{\delta} \cdot \omega_{ш}^{\delta}}{d_{ш}^{эу}} =$$

$$= 1,97 \frac{0,4 \cdot 2,92 \cdot 5,96}{0,1} = 138 \text{ с}^{-1}.$$

Выбираем электродвигатель 4А90Л6УЗ N = 2,2 кВт, n = 1425 об/мин, к.п.д. – 80%, cos φ = 0,83 [3].

Таким образом, используя положения теории подобия, через полученные значения масштабных коэффициентов рассчитали угловую скорость шестерни редуктора лабораторного стенда, выбрали электродвигатель и получили возможность проведения полных исследований, направленных на повышение ресурса узлов трения в приводах скиповых лебедок доменного цеха ОАО «ММК».

Библиографический список

1. Коднир, Д.С. Эластогидродинамический расчет деталей машин [Текст] / Д.С. Коднир, Е.П. Жильников, Ю.И. Байбородов. М.: Машиностроение, 1988. 166 с.
2. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования [Текст] / В.А. Веников, Г.А. Веников. М.: Высш. шк., 1984. 439 с.
3. Длоугий, В.В. Приводы машин: Справочник [Текст] / В.В. Длоугий, Т.И. Муха, А.П. Цупиков, Б.В. Януш; Под общ. ред. В.В. Длоугого. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. 383 с.
4. Жиркин, Ю.В. Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин: Учебник [Текст] / Ю.В. Жиркин. Магнитогорск, МГТУ, 2002. 330 с.
5. Жиркин, Ю.В. Основы теории трения и изнашивания: Учеб. пособие [Текст] / Ю.В. Жиркин. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 95 с.

УДК 669.18.046.518:621.746.27М

Пиксаев В.А.

ВОЗМОЖНЫЙ ПРИНЦИП МОДЕРНИЗАЦИИ МНЛЗ

В России в настоящее время в большом количестве производятся непрерывно литые заготовки для трубного штрипса и автомобильного листа, наличие прокатных дефектов на поверхности которых недопустимо. Наиболее серьезной, из-за невозможности устранения, причиной появления данных дефектов являются внутренние (гнездообразные и перпендикулярные) трещины, которые в основном образуются в процессе распрямления заготовки. Нами произведен анализ внутренней структуры темплетов, отобранных от заготовок из сталей трубных марок, произведенных на отечественной криволинейной МНЛЗ ОАО «ММК». В результате анализа обнаружено, что 93,9 и 92,7% заготовок поражено при их распрямлении соответственно гнездооб-

разными и перпендикулярными трещинами [1].

Базовым принципом проектирования ответственных МНЛЗ является подавление процесса образования высокотемпературных (залечивающихся) трещин в зоне, примыкающей к фронту кристаллизации заготовки. Для реализации данного принципа профиль криволинейного участка принимают таким, чтобы деформация от распрямления по фронту кристаллизации заготовки распределялась равномерно. Известно, что при этом в слоях, равноудаленных от геометрической оси заготовки, та же деформация распределяется неравномерно с максимумом в конце участка распрямления. Аналогично распределяется плотность потенциальной энергии распрямления в теле заготовки, что, вероятно, является причиной

образования в нем большего количества средне-температурных (не залечивающихся) трещин. В связи с этим необходима модернизация отечественных МНЛЗ и разработка ее принципа, направленного на уменьшение количества трещин в теле заготовок [2, 3].

По принятой исследователями в области ОМД модели деформация металла сопровождается его пластическим разрыхлением. Разрыхление состоит в развитии первоначальной дислокационной структуры до образования энергетически устойчивых макротрещин (трещин). Интенсивность процесса разрыхления и конечный результат его развития зависят от термомеханических условий деформации [4].

В различных элементарных объемах заготовки перед ее распрямлением сосредоточено различное количество дислокаций: элементарные объемы заготовки имеют разную степень развития дислокационной структуры. При существующих режимах разлива (скорость $v \approx 0.8$ м/мин) распрямление заготовки сопровождается увеличением в данных объемах в основном потенциальной энергией ее изгиба. Сосредоточенная в элементарных объемах потенциальная энергия обеспечивает функционирование там источников Франка-Рида, в результате действия которых количество дислокаций в них увеличивается. Скорость развития процесса зависит от определяемого плотностью потенциальной энергии количества систем скольжения, в которых действие источников становится энергетически возможным. Процесс распрямления заготовки ограничен во времени, поэтому при конкретном его режиме (исходный радиус заготовки и скорость изменения ее кривизны) устойчивые трещины образуются в элементарных объемах, имевших до распрямления определенную степень развития дислокационной структуры. Принимая во внимание существующий энергетический критерий разрушения деформируемого металла Л.Г. Степанского, можно предположить, что в результате снижения плотности потенциальной энергии количество трещин в ее теле уменьшится [5].

Таким образом, модернизация отечественных МНЛЗ должна быть направлена на снижение в заготовке плотности потенциальной энергии ее распрямления. Это возможно за счет или увеличения исходного радиуса заготовки (увеличения базового радиуса машины R_R), или за счет уменьшения скорости изменения ее кривизны (перепрофилирования участка распрямления). Наименее затратой является модернизация, состоящая в перепрофилировании участка распрямления [6].

Для оценки напряженно-деформированного состояния нами разработана математическая мо-

дель распрямления заготовки. Модель разработана на основе первой версии известного метода вязкопластических слабосжимаемых конечных элементов К. Мори, К. Осакады. Критерий пластичности Губера ими записывается следующим образом:

$$\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} + g \sigma_m^2 - \bar{\sigma}^2 = 0, \quad (1)$$

где σ'_{ij} – девиатор напряжений; g – малая положительная константа (0,0001); σ_m – гидростатическое напряжение; $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений [7].

Принимается, что объем материала в процессе пластической деформации несколько изменяется, и напряжения могут быть рассчитаны по скорости деформации

$$\{\sigma\} [D] \{\dot{\epsilon}\}. \quad (2)$$

Поскольку сжатие конечных элементов во время деформации незначительно, что отражено в малой величине константы g , условие постоянства объема деформируемого материала приблизительно выполняется.

Дифференциальные уравнения равновесия в объеме V_e и граничные силы T_i на его поверхности S_e конечного элемента e записываются в видах:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} + G_i = 0, \quad (3)$$

$$T_i = \sigma_{ij} n_j, \quad (4)$$

где G_i – объемная удельная сила; n_j – вектор нормали к поверхности.

После умножения уравнения (3) на скорость v_i и интегрирования результата по объему

$$\int_{V_e} \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} + G_i \right) v_i dV_e = 0. \quad (5)$$

В результате интегрирования выражения (5) по частям и с учетом выражения (4) получено выражение виртуальной работы для конечного элемента

$$\int_{V_e} \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV_e - \int_{V_e} G_i v_i dV_e = \int_{S_e} T_i v_i dS_e. \quad (6)$$

Распределение скоростей для конечного элемента записывается в виде

$$v_i = [N] \{v_e\}, \quad (7)$$

где $\{N\}$ – функция формы конечного элемента; $\{v_e\}$ – векторы узловых скоростей.

В результате дифференцирования уравнения (7) получено выражение для скоростей деформаций

$$\dot{\epsilon} = [B] \{v_e\}, \quad (8)$$

где $[B]$ – матрица, связи компонент скоростей деформаций с компонентами узловых скоростей.

Виртуальная работа для конечного элемента через вектора узловых сил $\{P\}$ с использованием выражения (7)

$$\int_{V_e} \{\dot{\epsilon}\}^T \{\sigma\} dV_e - \int_{V_e} \{v_e\}^T [N]^T \{G\} dV_e = \{v_e\}^T \{P\}. \quad (9)$$

После подстановки в выражение (9) выражений (8), (2) и необходимых преобразований для конечного элемента e получена зависимость между компонентами и узловых сил и скоростей

$$\{P\} = \left[\int_{V_e} [B]^T [D][B] dV_e \right] \{v_e\} - \int_{V_e} [N]^T \{G\} dV_e. \quad (10)$$

Или, пренебрегая массовыми силами $\{G\} \approx 0$:

$$\{P\} = \left[\int_{V_e} [B]^T [D][B] dV_e \right] \{v_e\}, \quad (11)$$

где $\sum_e P_{ik} = \begin{cases} 0 & (\text{в теле}) \\ F_{ik} & (\text{на поверхности}) \end{cases}, \quad i = x, y, z,$

$k = 1, \dots, n$; F_{ik} – внешние силы, приложенные в узлах, включая силы трения и силы, нормальные к поверхности.

В качестве граничного условия принимают касательные напряжения в зоне контакта валков с деформируемым металлом. При этом их векторы раскладывают на две ортогональные проекции по осям X и Y . Так как направление контактного касательного напряжения противоположно относительной скорости

$$\begin{aligned} \tau_{jX} &= -\tau_f (v_{mX} - v_{eX}) / \Delta v^*; \\ \tau_{jY} &= -\tau_f (v_{mY} - v_{eY}) / \Delta v^*, \end{aligned} \quad (12)$$

где v_{mX} и v_{mY} – проекции скорости металла в зоне контакта; v_{eX} и v_{eY} – проекции скорости валка.

Для плавного изменения касательного контактного напряжения в точках нейтральной линии принимают

$$\Delta v^* = \sqrt{\Delta v^2 + v_s^2}, \quad (13)$$

где Δv^* – относительная скорость; v_s – малая, сравнительно с модулем относительной скорости в удаленных от нейтральной линии областях зоны контакта, положительная константа.

Принимают, что уравнения равновесия выполняются в начале каждого шага деформации, и изменением геометрии конечных элементов и механических свойств их металла можно пренебречь.

На основании данного метода разработан оригинальный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния заготовки в роликовой проводке участка распрямления отечественной МНЛЗ. Уравнение (11) в нем решается для каждого шага деформации методом прямых итераций. Для реализации алгоритма создан пакет компьютерных программ, который использовали при определении напряженно-деформированного состояния заготовок сечением 1350×250 из стали 17Г1С при их литье на МНЛЗ № 4 ОАО ММК.

При реализации алгоритма был принят ряд допущений:

- толщина оболочки постоянна в промежутке между роликами и соответствует решению задачи затвердевания заготовки [3];
- температура заготовки постоянна в промежутке между роликами и соответствует решению задачи затвердевания заготовки;
- тянущие ролики абсолютно жесткие;
- настройка тянущих роликов идеальная.

Влияние жидкой фазы заменили ее ферростатическим давлением.

Касательные контактные напряжения определили по часто применяемому при решении задач, связанных с горячей деформацией металла, закону Зибеля:

$$\tau_f = m'k, \quad (14)$$

где $m' = 0,7$ – показатель сухого трения при горячей деформации; k – предел текучести на сдвиг.

Заготовку заменили ее математической моделью, в которой она представлена разбитой на тетраэдральные конечные элементы с размерами ребер от 13 до 39,5 мм (меньшие значения у кромок). Как только в процессе деформирования размеры сетки изменялись чрезмерно, разбиение

заготовки перестраивали в соответствии с требуемой точностью и скоростью расчета. Математическую модель заготовки объединили с математической моделью роликовой проводки участка распрямления МНЛЗ (рис. 1).

В качестве исходных параметров задавали:

- толщину и ширину исходной заготовки;
- зависимости, определяющие механические свойства стали [8];
- распределение температуры по объему заготовки;
- толщину оболочки заготовки в пределах участка распрямления;
- параметры, входящие в закон трения по Зибелю;
- координаты осей тянущих роликов;
- диаметры тянущих роликов;
- скорости вращения тянущих роликов.

Результатом решения было поле деформаций в теле заготовки (рис. 2).

Расчеты выполнялись на ЭВМ DESTERN COMPUTERS Intel (R) Xeon (R) CPU 51110 1,6 GHz, 1,6 GHz, 1,99 Гб ОЗУ. Один расчет занял 150 часов машинного времени, что практически исключает возможность использования

рассмотренного выше метода при проектировании и модернизации МНЛЗ.

Из рис. 2 видно, что в зоне контакта ролика с телом заготовки величина деформации достигает 10%. Объем данной зоны имеет относительно небольшую величину. За пределами зоны деформация составляет 1–3%. Такая же деформация во всей плоскости в промежутке между роликами. Деформация 1–3% может быть отнесена к малым деформациям. На основании этого для процесса распрямления может быть применена гипотеза плоских сечений. Применение данной гипотезы широко практикуется отечественными и зарубежными исследователями в области непрерывной разливки [9, 10].

Для разработки принципа модернизации определим площадь F_1 и среднюю температуру затвердевшей части T_1 поперечного сечения заготовок в пределах участка распрямления. Поперечными сечениями, отстоящими друг от друга на расстоянии dl , в теле заготовки на участке ее распрямления выделим элементарный объем. Используя гипотезу плоских сечений, определим распределение плотности потенциальной энергии распрямления [3].

$$de_{pl} = \frac{b}{6F_1} \left(\frac{1}{R_l} - \frac{1}{R_{l+dl}} \right)^2 \times \times E_l \left[3 \left(\frac{h}{2} \right)^2 \delta_l - 3 \left(\frac{h}{2} \right) \delta_l^2 + \delta_l^3 \right]. \quad (15)$$

При известном распределении плотности ее неравномерность, как отношение максимума к минимуму:

$$ne_{pl} = \frac{ne_{pl}^{max}}{ne_{pl}^{min}}. \quad (16)$$

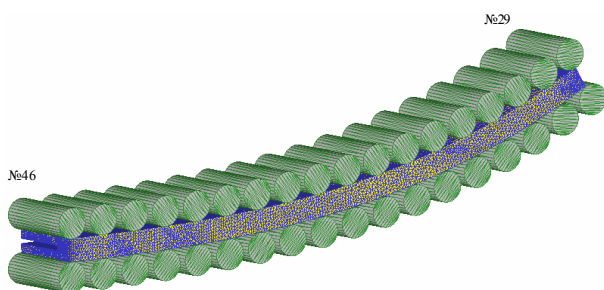


Рис. 1. Заготовка в роликовой проводке участка распрямления МНЛЗ

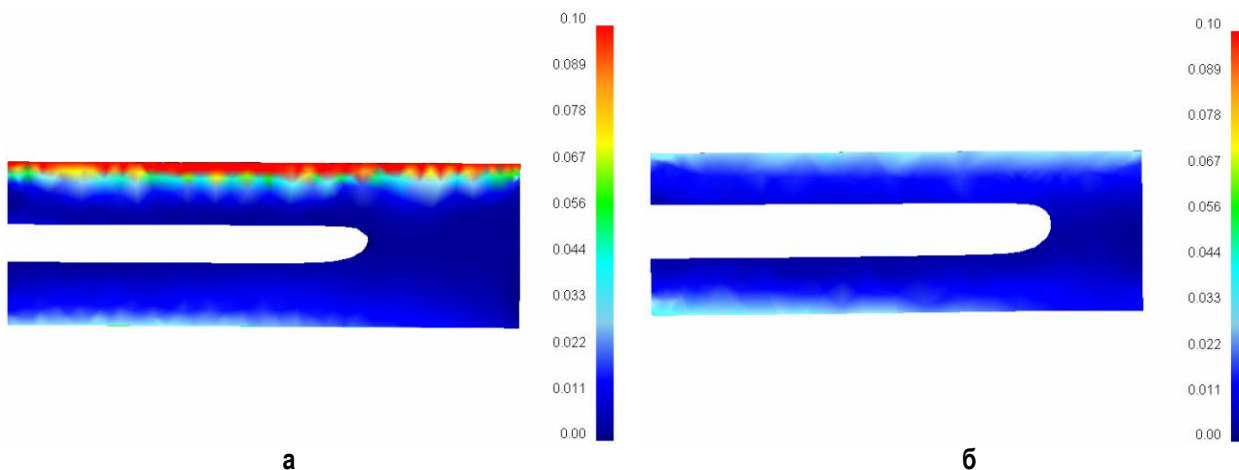


Рис. 2. Поле деформаций в плоскостях:
а – 46-й пары роликов; б – между 37-й и 38-й парами роликов

Вычислим неравномерность для различных, определяемых коэффициентом m профилей участка распрямления (рис. 3).

Из рисунка видно, что для участка распрямления отечественных МНЛЗ ($m=0.618$) характерна высокая неравномерность распределения по его длине плотности потенциальной энергии. Почти на порядок меньшее значение неравномерности распределения и плотности потенциальной энергии может быть получено при использовании профиля с $m \approx 1,1$, причем это имеет место для заготовок из всех рассмотренных марок стали.

Полученный для заготовок из трубных сталей результат был использован при модернизации МНЛЗ № 4 ОАО «ММК», состоящей в пере профилировании секций № 7 и 8 участка распрямления машины. Модернизация привела к уменьшению количества внутренних трещин на 9,6% [3].

Полученный положительный результат подтверждает эффективность разработанного принципа модернизации отечественных МНЛЗ. Суть

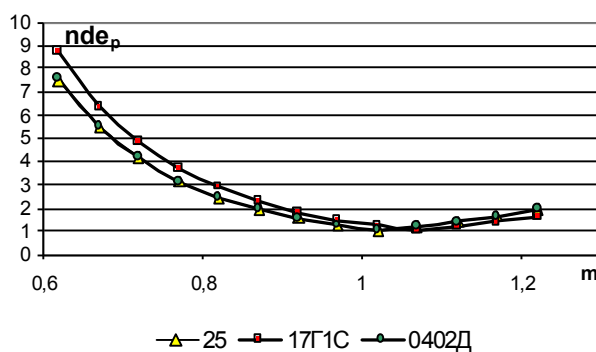


Рис.3. Неравномерность распределения плотности потенциальной энергии

принципа состоит в том, что для уменьшения количества внутренних трещин криволинейный участок машины должен быть пере профилирован так, чтобы в теле заготовки было обеспечено равномерное распределение плотности потенциальной энергии распрямления.

Библиографический список

1. Кондратов Л.А. Развитие производства стальных труб в 2002 г. // Сталь. 2003. № 1. С.81–84.
2. Пиксаев В.А. Возможный путь реконструкции МНЛЗ для производства качественных заготовок из трубных сталей // Сталь. 2005. № 8. С. 34–35.
3. Пиксаев В.А., Ячиков И.М. Опыт применения энергетического критерия при проектировании МНЛЗ // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 26–29.
4. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев и др. М.: Металлургия, 1977. 336 с.
5. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1978. 359 с.
6. Пиксаев В.А., Вдовин К.Н. О возможности пере профилирования участка распрямления криволинейной МНЛЗ для производства заготовок повышенного качества из сталей трубных марок // Труды восьмого конгресса сталеплавателей. М.: Черметинформация, 2005. С. 491–493.
7. Osakada, K., Nakano, J. and Mori, K., Finite Element Method for Rigid-Plastic Analysis of Metal Forming – Formulation for Finite Deformation, Int. // Mech. Sci. 1982. 24. P. 459–468.
8. Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г., Прицкер Б.С. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава // Сталь. 1972. № 6. С. 522–523.
9. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л.В. Буланов, Л.Г. Корзунин, Е.П. Парфенов и др. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. 320 с.
10. Беренов А.Д., Карлинский С.Е. Совершенствование зоны вторичного охлаждения слябовых МНЛЗ в СССР и за рубежом // Конструирование и эксплуатация оборудования. Сер. 1. Металлургическое оборудование. Вып. 9. М.: ЦНИИТЭИ-тяжмаш, 1987. 36 с.