

Пиксаев В.А., Ячиков И.М.

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МНЛЗ

В последнее время наметилась устойчивая тенденция по расширению марочного сортамента сталей, разливаемых на отечественных криволинейных МНЛЗ. Актуальна их модернизация, направленная на подавление процесса образования внутренних гнездообразных и перпендикулярных трещин в теле отливаемых заготовок [1, 2].

По принятой исследователями в области ОМД модели деформация металла сопровождается его пластическим разрыхлением, состоящим в первоначальном развитии дислокационной структуры, последующем образовании зародышевых субмикротрещин, их росте и слиянии и, наконец, образованием энергетически устойчивых макротрещин (трещин). Интенсивность данных процессов и конечный результат их развития зависят от термомеханических параметров деформации [3].

Заготовки с минимальным количеством внутренних трещин могут быть получены только на специально созданных для их производства машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Тогда на основании анализа, проведенного с использованием известных математических моделей процесса образования внутренних трещин, можно уже при проектировании машин заложить в их конструкцию то, что должно привести к повышению качества заготовок: достаточно большой базовый радиус, роликтовую проводку, секции с оптимальными геометрическими параметрами и т.п. [4–6].

При использовании существующих МНЛЗ количество внутренних трещин в теле заготовок можно уменьшить за счет их модернизации. Наименее затратной может быть модернизация, состоящая в изменении геометрических параметров участка распрямления машин. Изменение, как известно, должно быть направлено на изменение профиля участка в его пределах [7, 8].

В настоящее время для процессов, связанных с пластической деформацией стали, получили распространение деформационные критерии разрушения. Л.Г. Степанский, определяя предельные деформации при прессовании, полагает, что работа пластической деформации элементарного объема не должна превышать некоторое критическое значение. Принятый им энергетический критерий разрушения эквивалентен деформационным критериям [1].

Применим аналогичный критерий для проек-

тирования эффективного, с точки зрения уменьшения количества внутренних трещин, профиля участка распрямления заготовки. Предположим, что уменьшение количества трещин будет иметь место, если плотность потенциальной энергии в распрямляемой заготовке не превысит критического значения для мест с более развитой до начала процесса распрямления дислокационной структурой. Возникновение такой ситуации наиболее вероятно при равномерном распределении плотности по длине участка, исключая наличие максимумов, которые могут оказаться вышеупомянутыми критическими значениями.

Поперечными сечениями, отстоящими друг от друга на расстоянии  $dl$ , выделим элементарный объем в теле заготовки на участке ее распрямления. Потенциальная энергия от изгиба затвердевшей части данного объема

$$dE_{pl} = bdl \int_{h/2-\delta}^{h/2} \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y dy, \quad (1)$$

где  $b$ ,  $h$  – ширина и толщина заготовки;  $\delta_l = (b+h)/4 - \sqrt{[(b+h)/4]^2 - F_l/4}$  – толщина обочечки заготовки;  $\sigma_y = E_l \varepsilon_y$  – напряжение в слое;  $\varepsilon_y = (1/R_l - 1/R_{l+dl})y$  – деформация в слое;  $F_l$  – площадь затвердевшей части поперечного сечения;  $E_l = -4,566 \cdot 10^{11} + 1,6 \cdot 10^8 T_l + 3,266 \cdot 10^{14} / T_l$  – модуль упругости стали;  $R_l = R_r [(1-m) + ml_k / (l_r + l_k - l)]$ ,  $R_{l+dl} = R_r [(1-m) + ml_k / (l_r + l_k - l - dl)]$  – радиусы профиля участка распрямления на границах элементарного объема;  $y$  – расстояние до слоя от оси заготовки;  $T_l$  – средняя температура затвердевшей части поперечного сечения;  $R_r$  – базовый радиус МНЛЗ;  $m$  – коэффициент профиля участка распрямления;  $l_k = \alpha_s R_r (1-m) / [1 + m \cdot \ln |m| / (1-m)]$  – длина профиля участка распрямления;  $\alpha_s$  – угол сопряжения радиального и криволинейного участков [9].

Для определения площади  $F_l$  и средней температуры затвердевшей части  $T_l$  поперечного сечения была разработана математическая модель затвердевания непрерывно-литой заготовки.

За начало отсчета в декартовой системе координат принят мениск жидкой стали в кристаллизаторе, причем ось  $z$  направлена по оси слитка. При разработке модели использовали квазиравновесную теорию двухфазной зоны. За основу модели приняли нелинейное уравнение теплопроводности при граничных условиях второго и третьего рода. При этом распределение температуры в затвердевающей заготовке в системе отсчета, связанной с Землей, описывается стационарным уравнением теплопроводности:

$$c_f \rho v \frac{\partial t}{\partial z} - \rho L v \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где  $v$  – скорость разливки;  $L$  – удельная теплота плавления.

Эффективную удельную теплоемкость  $c_f$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и плотность стали  $\rho$  представили кусочно-непрерывными функциями:

$$c_f = \begin{cases} c_g & \text{при } t > t_i; \\ c_i(t_s)\psi + c_g(1-\psi) - L \frac{\partial \psi}{\partial \tau} & \text{при } t_s < t < t_i; \\ c_i(t) & \text{при } t \leq t_s; \end{cases}$$

$$\lambda = \begin{cases} k_\lambda \lambda_g & \text{при } t > t_i; \\ \lambda_i(t_s)\psi + \lambda_g(1-\psi) & \text{при } t_s < t < t_i; \\ \lambda_i(t) & \text{при } t \leq t_s; \end{cases}$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_g & \text{при } t > t_i; \\ \rho_i\psi + \rho_g(1-\psi) & \text{при } t_s < t < t_i; \\ \rho_i & \text{при } t \leq t_s, \end{cases}$$

где  $t_s, t_l$  – соответственно температура солидуса и ликвидуса;  $\psi = (t_l - t)/(t_l - t_s)$  – доля твердой фазы [10];  $k_\lambda = 5 \div 10$  – коэффициент увеличения коэффициента теплопроводности за счет циркуляции жидкой фазы.

Уравнение (2) дополняли краевыми условиями. На расчетную рабочую область накладывали прямоугольную сетку. Применяя симметричную аппроксимацию пространственных производных и метод расщепления по координатам, используя метод конечных

Таблица результатов моделирования для разных марок стали

Марка стали	Площадь затвердевшей части поперечного сечения, м <sup>2</sup>	Температура затвердевшей части поперечного сечения, °С
Сталь 25	$F_l = 0,0117 \cdot l + 0,1092$	$T_l = -6,9823 \cdot l + 1275,8$
Сталь 17Г1С	$F_l = 0,01 \cdot l + 0,1293$	$T_l = -7,393 \cdot l + 1341,5$
Сталь 0402Д	$F_l = 0,0116 \cdot l + 0,115$	$T_l = -6,9778 \cdot l + 1279$

разностей, получили систему линейных уравнений, которую решали методом прогонки.

Математическую модель адаптировали к условиям МНЛЗ №4 ККЦ ОАО «ММК». Для каждой зоны вторичного охлаждения коэффициент теплоотдачи определялся по следующему выражению:  $\alpha_i = a_i + b_i q_i$ , где  $q_i$  – удельный расход воды на единицу площади;  $a_i, b_i$  – параметры модели для отдельных зон,  $i=1, 2, \dots$ .

Подбирались параметры  $a_i, b_i$ , чтобы имел место 5% уровень значимости теоретически определенной величины температуры поверхности в середине широкой грани малого радиуса при сравнении с величиной аналогичной температуры, определенной экспериментально. Для настройки программы использовались промышленные данные по определению температуры поверхности заготовки (сталь 17Г1С), полученные сотрудниками лаборатории непрерывной разливки ККЦ ОАО «ММК» [11].

Для численной реализации математической модели разработана компьютерная программа [12], которая позволяет рассчитать температурное поле поперечных сечений заготовки в плоскостях пар роликов. При этом учитывается охлаждение стали определенного химического состава в кристаллизаторе и частично затвердевшей заготовки в зоне вторичного охлаждения. Площадь затвердевшей части поперечного сечения заготовки  $F_l$

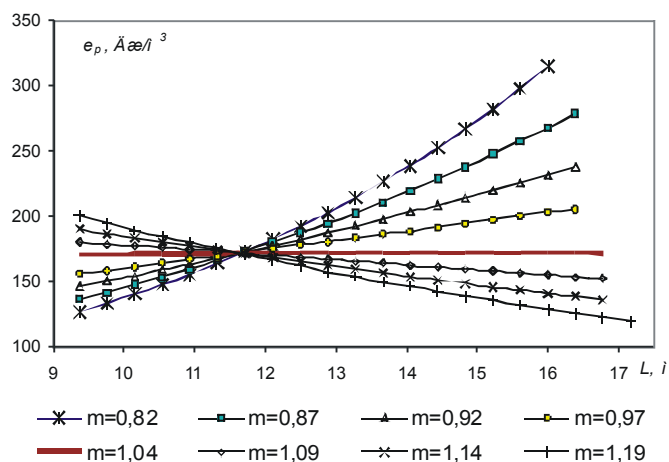


Рис. 1. Распределения плотности потенциальной энергии по длине заготовки, выполненной из стали 25

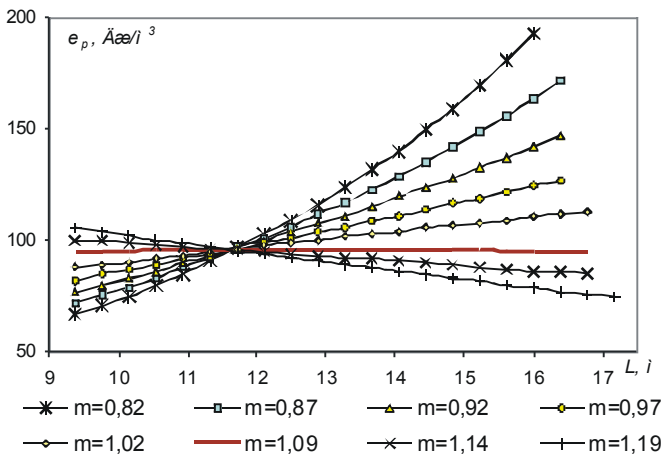


Рис. 2. Распределения плотности потенциальной энергии по длине заготовки, выполненной из стали 17Г1С

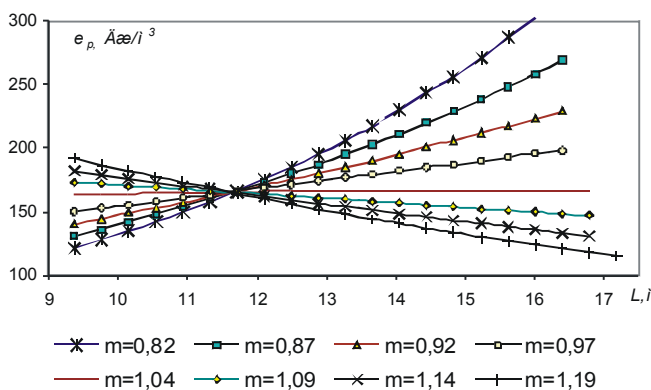


Рис. 3. Распределения плотности потенциальной энергии по длине заготовки, выполненной из стали 0402Д

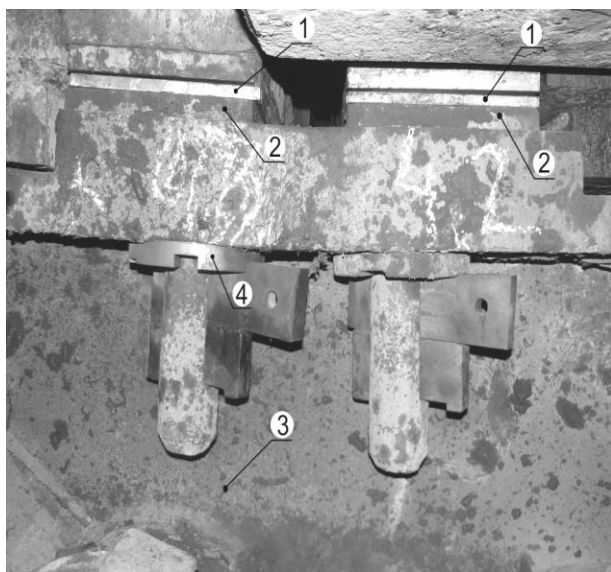


Рис. 4. Установка четыреххромокиевых блоков

определяется как сумма площадей ячеек, в которых температура равна или ниже температуры солидуса. Температура  $T_l$  – как среднеинтегральная температура данных ячеек.

Проведено компьютерное моделирование для заготовок сечением 1350×250 мм, отливаемых со скоростью 0,7 м/мин из сталей, охлаждаемых по различным режимам: 1 группа (сталь 25); 2 группа (сталь 17Г1С); 4 группа (сталь 0402Д) [13].

Результаты моделирования обработаны в виде уравнений регрессии и представлены в таблице.

После необходимых подстановок интегрирования и преобразований получим выражение для плотности потенциальной энергии, при равномерном распределении которой производная от него должна быть равна нулю:

$$de'_{pl} = \frac{bdl}{6F_l} \left( \frac{1}{R_l} - \frac{1}{R_{l+dl}} \right)^2 \times \times E_l \left[ 3 \left( \frac{h}{2} \right)^2 \delta_l - 3 \left( \frac{h}{2} \right) \delta_l^2 + \delta_l^3 \right]'_l = 0 \quad (6)$$



Рис. 5. Шаблоны и контршаблоны

Аналитическое решение данного уравнения при значительной сложности подстановок (1) трудно осуществимо, поэтому задача решалась численным способом. При этом оказалось достаточным вычислить плотность потенциальной энергии в плоскостях пар правящих роликов для различных профилей участка распрямления, определяемых коэффициентом  $m$ . Результаты вычислений представлены графически на **рис. 1–3**.

Из рисунков видно, что равномерное распределение плотности потенциальной энергии распрямления в заготовках из сталей первой группы (сталь 25) имеет место, если коэффициент профиля  $m=1,04$ , из сталей второй группы (сталь 17Г1С) –  $m=1,09$  и сталей четвертой группы –  $m=1,04$ .

Полученный для заготовок из сталей второй группы (трубные стали) результат был использован при модернизации МНЛЗ № 4 ОАО «ММК», состоящей в перепрофилировании секций № 7 и 8 участка распрямления машины [14].

Блоки секций были выставлены на новый профиль путем установки подкладок определен-

ной толщины 1 на планки 2 рам 3 секций. Крепление блоков на раме осуществили с использование основных шайб 4 специальной конструкции (**рис. 4**).

Предварительную выставку секций осуществили с использованием нивелира Н05, а для окончательной выставки роликов и контроля ее точности применяли специально изготовленные шаблоны 1. Для проверки шаблонов использовали контршаблоны 2 (**рис. 5**).

На модернизированной машине была разлита 1991 плавка сталей различных марок. При анализе парных (82 пары) темплетов от заготовок из сталей трубных марок обнаружено, что количество перпендикулярных и гнездовых внутренних трещин в теле заготовок со стороны малого радиуса уменьшилось почти на 10%.

Таким образом, разработан метод проектирования участка распрямления криволинейной МНЛЗ, обеспечивающего снижение количества внутренних трещин в теле отливаемых заготовок.

#### Библиографический список

1. Кондратов Л.А. Развитие производства стальных труб в 2002 г. // Сталь. 2003. № 1. С. 81–84.
2. Федорчук Е.В., Мазун А.И., Гладышев Н.Г. Повышение качества трубных заготовок, отливаемых на МНЛЗ // Сталь. 1985. № 4. С. 31–33.
3. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 114 с.
4. Оценка предельного состояния металла при разгибе слитка на МНЛЗ без разрушения / А.А. Богатов, С.П. Кротов, Г.Н. Мигачева и др. // Изв. АН СССР. Металлы. 1986. № 6. С. 90–93.
5. Оценка поврежденности непрерывнолитого металла при выпучивании корки слитка между поддерживающими роликами МНЛЗ / А.А. Богатов, С.П. Кротов, Г.Н. Мигачева и др. // Проблемы прочности. 1988. № 3. С. 79–85.
6. Оптимизация конструктивных параметров криволинейных МНЛЗ / С.И. Паршаков, А.А. Богатов, С.П. Кротов и др. // Изв. АН СССР. Металлы. 1991. № 1. С. 66–71.
7. Флендер Р., Вюнненберг К. Образование внутренних трещин в непрерывно литых заготовках // Черные металлы. 1982. № 23. С. 24–32.
8. Исследование непрерывной разливки стали: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Б. Лина. М.: Металлургия, 1982. 200 с.
9. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. М.: Металлургия, 1991. 272 с.
10. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович, С.А. Крулевецкий, В.А. Горяинов и др. М.: Металлургия, 1982. 152 с.
11. Горосткин С.В. Совершенствование режимов вторичного охлаждения слябовых непрерывнолитых заготовок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / МГТУ. Магнитогорск, 2002.
12. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7310. Кристаллизующаяся заготовка / В.А. Пиксаев, Е.В. Пиксаев, И.М. Ячиков и др. // Зарегистрировано в НИФНД, № 50200602123.
13. Разливка стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) кислородно-конвертерного цеха № 1: Технологическая инструкция ТИ-101-СТ-ККЦ-10-2003 / ЗАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Магнитогорск, 2003. 102 с.
14. Патент на полезную модель 50453 Россия, МКИ В22D 11/14. Машина непрерывного литья заготовок / Ю.А. Бодяев, И.М. Захаров, В.М. Корнеев, В.А. Пиксаев, Е.В. Пиксаев.