

УДК 621.771.01: 621.982.45

Сатонин А. В.
Куберский С. В.
Стриченко С. М.
Завгородний А. В.

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ИХ «МЯГКОМ» ОБЖАТИИ

Реализация процесса «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок, представляющего собой их прокатку при неполной кристаллизации поперечного сечения, позволяет существенно снизить осевую пористость и ликвацию, интенсифицировать измельчение первичного зерна и, как следствие, повысить качество готовой металлопродукции [1, 2]. В то же время специфика схемы напряженно-деформированного состояния непрерывнолитых заготовок при их обжати, а именно наличие жидкой фазы в осевой зоне и значительные перепады температур по толщине и ширине делают необходимым дальнейшее развитие соответствующих методов расчета. С точки зрения конечно-элементных подходов решение данной задачи представлено в работах [1, 3, 4]. Вместе с тем представляет интерес и реализация инженерных подходов, обеспечивающих снижение трудоемкости и повышение быстродействия получения требуемых результатов.

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния металла непрерывнолитых сортовых заготовок при их «мягком» обжати на основе инженерных методов расчета.

Используемая в этом случае расчетная схема поперечного сечения, подвергаемой «мягкому» обжатию, непрерывнолитой заготовки, имеющей толщину H и ширину B представлена на рис. 1. При этом количественные оценки толщин кристаллизовавшихся корок по вертикали и по горизонтали d_{kz} могут быть определены на основе инженерной методики работы [5], предполагающей первоначальное определение времени полной кристаллизации t_k и соответствующей ему металлургической длины:

$$t_k = H^2 / (4K_{кр}^2); \quad L_M = V_L t_k, \quad (1)$$

с последующим непосредственным определением толщин кристаллизовавшихся корок d_{kx} на любом расстоянии от мениска кристаллизатора L_{mx} :

$$d_{kx} = 0,5HL_{mx} / L_M, \quad (2)$$

где $K_{кр} = 20...30$ – коэффициент кристаллизации, определяемый материалом получаемых непрерывнолитых заготовок;

V_L – скорость разливки.

С учетом известных согласно (1), (2) текущих значений толщин твердой фазы d_{ky} и d_{kz} расчетная схема поперечного сечения непрерывнолитой сортовой заготовки может быть представлена в виде рамы (см. рис. 1), имеющей поперечины длиной $L_1 = B - d_{kz}$ и стойки длиной $L_2 = H - d_{ky}$. При этом поперечины нагружены внешней погонной нагрузкой на плече L_1 от силы «мягкого» обжатия q_{mo} и внутренней погонной нагрузкой на плече $a_1 = B - 2d_{kz}$ от ферростатического давления жидкого металла $q_{\phi\delta}$. Стойки же нагружены на

плече $a_2 = H - 2d_{кy}$ только от ферростатического давления жидкого металла. Количественно погонные нагрузки q_{mo} и $q_{фд}$ могут быть определены как:

$$q_{mo} = P_{mo} / L_{mo}; \quad q_{фд} = r_m g h_x L_{mo}, \quad (3)$$

где P_{mo} – полная величина силы процесса «мягкого» обжатия, создаваемая соответствующими нажимными механизмами;

$L_{mo} = \sqrt{R_g \Delta h - \Delta h^2 / 4}$ – общая протяженность очага деформации при «мягком» обжатии;

$R_g, \Delta h$ – радиус рабочих валков и величина абсолютного обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки;

r_m, g – плотность жидкого металла и ускорение свободного падения;

h_x – высота рассматриваемого сечения по отношению к кристаллизатору.

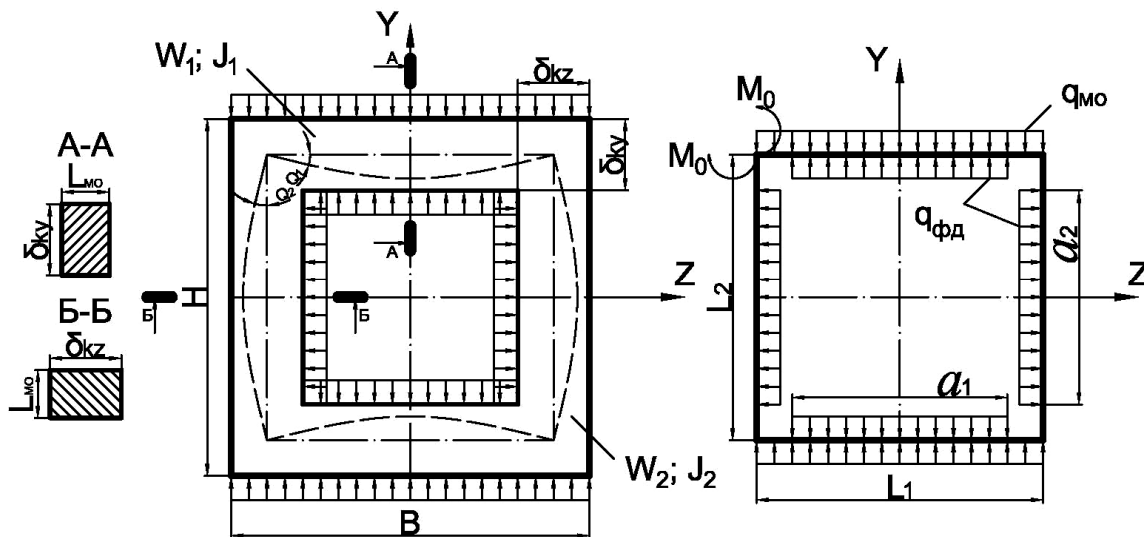


Рис. 1. Схема к расчету напряженно-деформированного состояния металла непрерывнолитых сортовых заготовок при их «мягком» обжатии

Кроме того, в местах сопряжения стоек и поперечин рассматриваемой рамы (см. рис. 1) имеет место действие статически неопределимого момента M_0 , обеспечивающего условие равенства углов прогиба поперечин Q_1 и стоек Q_2 . Величина углов прогиба поперечин Q_1 , в свою очередь, может быть определена, исходя из условия:

$$Q_1 = Q_{1qm} - Q_{1qф} - Q_{1mo}, \quad (4)$$

где $Q_{1qm}, Q_{1qф}, Q_{1mo}$ – составляющие угла прогиба поперечин Q_1 от действия, соответственно, погонных нагрузок «мягкого» обжатия q_{mo} , ферростатического давления жидкого металла $q_{фд}$ и статически неопределимого момента M_0 .

Аналогично по отношению к углу прогиба Q_2 стоек рассматриваемой рамы:

$$Q_2 = Q_{2qф} + Q_{2mo}, \quad (5)$$

где $Q_{2qф}, Q_{2mo}$ – составляющие угла прогиба стоек Q_2 от действия ферростатического давления и статически неопределимого момента M_0 .

Согласно теории сопротивления материалов [6] составляющие углов прогибов Q_{1qm} , $Q_{1q\phi}$, Q_{1mo} , $Q_{2q\phi}$, Q_{2mo} могут быть определены как:

$$Q_{1qm} = q_{mo}L_1^3 / (24E_M J_1); \quad (6)$$

$$Q_{1q\phi} = \frac{q_{\phi\delta} a_1 L_1^2}{24E_M J_1} \left[1,5 + \frac{(L_1 - a_1) a_1^2}{2L_1^3} + \frac{a_1^3}{2L_1^3} - \frac{a_1^2}{L_1^2} \right]; \quad (7)$$

$$Q_{1mo} = M_0 L_1 / (2E_M J_1); \quad (8)$$

$$Q_{2q\phi} = \frac{q_{\phi\delta} a_2 L_2^2}{24E_M J_2} \left[1,5 + \frac{(L_2 - a_2) a_2^2}{2L_2^3} + \frac{a_2^3}{2L_2^3} - \frac{a_2^2}{L_2^2} \right]; \quad (9)$$

$$Q_{2mo} = M_0 L_2 / (2E_M J_2), \quad (10)$$

где E_M – модуль упругости материала кристаллизовавшейся корки, учитывающий ее усредненное значение температур;

$J_1 = L_{mo} d_{ky}^3 / 12$; $J_2 = L_{mo} d_{kz}^3 / 12$ – моменты инерции поперечных сечений поперечин и стоек рассматриваемой (см. рис. 1) рамы, соответственно.

Подставив выражения (4)–(10) в условие равенства углов прогиба $Q_1 = Q_2$, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{q_{mo} L_1^3}{24E_M J_1} - \frac{q_{\phi\delta} a_1 L_1^2}{24E_M J_1} \left[1,5 + \frac{(L_1 - a_1) a_1^2}{2L_1^3} + \frac{a_1^3}{2L_1^3} - \frac{a_1^2}{L_1^2} \right] - \frac{M_0 L_1}{2E_M J_1} = \\ & = \frac{q_{mo} L_2^3}{24E_M J_2} + \frac{q_{\phi\delta} a_2 L_2^2}{24E_M J_2} \left[1,5 + \frac{(L_2 - a_2) a_2^2}{2L_2^3} + \frac{a_2^3}{2L_2^3} - \frac{a_2^2}{L_2^2} \right] + \frac{M_0 L_2}{2E_M J_2}, \end{aligned} \quad (11)$$

откуда величина статически неопределимого момента M_0 в окончательном виде соответствует зависимости вида:

$$\begin{aligned} M_0 = \frac{1}{12} & \left\{ \frac{q_{mo} L_1^3}{J_1} - \frac{q_{\phi\delta} a_1 L_1^2}{J_1} \left[1,5 + \frac{(L_1 - a_1) a_1^2}{2L_1^3} + \frac{a_1^3}{2L_1^3} - \frac{a_1^2}{L_1^2} \right] - \frac{q_{mo} L_1^3}{J_1} - \right. \\ & \left. - \frac{q_{\phi\delta} a_2 L_2^2}{J_2} \left[1,5 + \frac{(L_2 - a_2) a_2^2}{2L_2^3} + \frac{a_2^3}{2L_2^3} - \frac{a_2^2}{L_2^2} \right] \right\} / (L_1 / J_1 + L_2 / J_2). \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом известных количественных оценок внешних и внутренних нагрузок q_{mo} , $q_{\phi\delta}$, M_0 , а также геометрических характеристик их приложения L_1, L_2, a_1, a_2 , в свою очередь, могут быть определены уровни напряжений, имеющих место в наиболее опасных сечениях на наружных и внутренних поверхностях посередине поперечин S_{nh} , S_{nv} и стоек S_{ch} , S_{cv} рассматриваемой (см. рис. 1) расчетной схемы:

$$S_{nh} = (q_{mo} L_1 L_{mo} / 8 - M_0 - q_{\phi\delta} L_{mo} a_1 / 8) / W_n - q_{\phi\delta} L_{mo} a_2 / (2F_n); \quad (13)$$

$$S_{nv} = (q_{mo} L_1 L_{mo} / 8 - M_0 - q_{\phi\delta} L_{mo} a_1 / 8) / W_n + q_{\phi\delta} L_{mo} a_2 / (2F_n); \quad (14)$$

$$S_{ch} = (M_0 + q_{\phi\delta} a_2 L_{mo} / 8) / W_c - (q_{mo} L_1 L_{mo} / 8 - q_{\phi\delta} a_1 L_{mo} / 8) / (2F_c); \quad (15)$$

$$S_{c\delta} = (M_0 + q_{\phi\delta} a_2 L_{mo} / 8) / W_c + (q_{mo} L_1 L_{mo} - q_{\phi\delta} a_1 L_{mo} / 8) / (2F_c), \quad (16)$$

где $W_n = L_{mo} d_{ky}^2 / 6$, $W_c = L_{mo} d_{kz}^2 / 6$ – моменты сопротивления изгибу сечений поперечин и стоек, соответственно;

$F_n = L_{mo} d_{ky}$; $F_c = L_{mo} d_{kz}$ – площади поперечных сечений поперечин и стоек рассматриваемой расчетной схемы (см. рис. 1).

Полученные в этом случае количественные оценки напряжений S_c с учетом их сопоставления с напряжениями текучести данного металла при соответствующем диапазоне температур [7] могут быть использованы в качестве критериев с точки зрения оценки устойчивости стоек и отсутствия бочкообразования получаемых непрерывнолитых сортовых заготовок.

ВЫВОДЫ

На основе инженерных подходов, предполагающих использование элементов теории сопротивления материалов, разработана инженерная методика расчета напряженно-деформированного состояния металла непрерывнолитых сортовых заготовок при реализации процесса их «мягкого» обжатия, позволяющая оценить результирующие показатели качества готовой металлопродукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минаев А. А. Совмещенные металлургические процессы : монография / А. А. Минаев. – Донецк : Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
2. Смирнов А. Н. Процессы непрерывной разливки : монография / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев [и др.]. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – 536 с.
3. Математическое моделирование прокатки непрерывного слитка из стали ШХ15 на стадии неполной кристаллизации его сердцевины / А. А. Миленин, Х. Дья, А. Б. Стеблов [и др.]. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 178–183.
4. Теоретический САД/САЕ анализ теплового состояния непрерывнолитого бляма в зоне «мягкого» обжатия / Е. Н. Смирнов, М. В. Григорьев, В. В. Передереев [и др.]. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 508–514.
5. Буланов Л. В. Машины непрерывного литья заготовок / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзулин, Е. П. Парфенов, Н. А. Юровский, В. Ю. Авдонин. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.
6. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наукова думка, 1975. – 705 с.
7. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

Сатонин А. В. – д-р техн. наук, проф. кафедры АММ ДГМА;

Куберский С. В. – канд. техн. наук, доц. ДГТУ;

Стриченко С. М. – вед. инженер-технолог ОАО «ЕМЗ»;

Завгородний А. В. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск.

ОАО «ЕМЗ» – ОАО «Енакиевский металлургический завод», г. Енакиево.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua