

УДК 621.771.06

Козлов П. Н., Савицкий В. В.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПЕТЛЕВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Литейно-прокатный агрегат (ЛПА) на базе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с двухвалковым или одноленточным кристаллизатором предназначен для производства относительно тонких и узких полос методом бесконечной прокатки. МНЛЗ с указанными типами кристаллизаторов позволяют получать непрерывно литые заготовки в основном толщиной 2...10 мм при ширине 300...1300 мм со скоростью литья на уровне 20...90 м/мин. Прокатный стан, установленный в технологической линии этих ЛПА, выполняет горячую прокатку непрерывно литых заготовок преимущественно с обжатием 30...70 % [1–3].

Организация работы ЛПА, в котором процессы литья и прокатки неразрывно связаны, требует синхронизации скоростей работы МНЛЗ и прокатного оборудования по условию постоянства секундного расхода металла по длине технологической линии агрегата. Современный уровень развития автоматизации обеспечивает выполнение этого требования, что позволяет проектировать компактные ЛПА, в которых непрерывно литая заготовка непосредственно подаётся от МНЛЗ в прокатный стан.

Однако, например, на заводе в г. Крефельд (Германия) работает ЛПА, в состав которого входит петлевое устройство (ПУ), размещённое между МНЛЗ и прокатным оборудованием [2]. ПУ в линии ЛПА увеличивает его общую длину, но позволяет с небольшой разницей во времени независимо регулировать скорости литья и прокатки без натяжения и подпора горячей плоской заготовки, например, при колебаниях уровня расплава в двухвалковом кристаллизаторе МНЛЗ в периоды чередования разливки стальной. Также ПУ может быть предназначено для регулирования процесса охлаждения плоской заготовки на выходе из МНЛЗ за счёт изменения длины образуемой петли [4].

ЛПА с одноленточным кристаллизатором реализован в виде экспериментальной (пилотной) установки в техническом университете г. Клаустхаль (Германия) [3, 5].

Особенностью ЛПА с одноленточным кристаллизатором является ярко выраженное неравномерное распределение температуры по толщине непрерывно литой заготовки [6]. Для выравнивания температуры по толщине заготовки до уровня, оптимального для начала горячей прокатки, в линии ЛПА обязательно размещается между МНЛЗ и прокатным оборудованием рольганг длиной порядка 50 м для естественного охлаждения заготовки в инертной атмосфере, препятствующей её окислению [3]. В [5] отмечается, что работа такого ЛПА может быть эффективна только при синхронизации скоростей разливки, движения ленты кристаллизатора, литой заготовки, прокатки, прокатанной полосы и смотки полосы в рулоны, которые зависят от изменения температуры металла на всех этапах литья и прокатки. Основываясь на вышесказанном, представляется уместным в опытно-промышленном варианте линии ЛПА с одноленточным кристаллизатором устанавливать в пределах длины рольганга охлаждения ПУ для накопления небольшого запаса заготовки, который совместно с автоматическим регулированием скоростей литья и прокатки, обеспечит эффективную работу ЛПА за счёт исключения условий для перенатяжения или передавливания горячей заготовки в технологической линии ЛПА.

Целью данной работы является выбор геометрических параметров ПУ и исследование движения тонкой горячей заготовки в ПУ для ЛПА с одноленточным кристаллизатором. ПУ представляет собой участок рольганга длиной L , на каждом конце которого установлена пара тянущих приводных роликов (см. рис. 1). Ролики рольганга ПУ имеют возможность опускаться ниже уровня движения заготовки, при этом часть роликов или все ролики

касаются двух воображаемых цилиндрических поверхностей с радиусом R и размещаются внутри них. Каждая цилиндрическая поверхность охватывает с касанием нижние тянущие ролики, а её ось кривизны находится в плоскости, проходящей через оси соответствующей пары тянущих роликов, и располагается под ними.

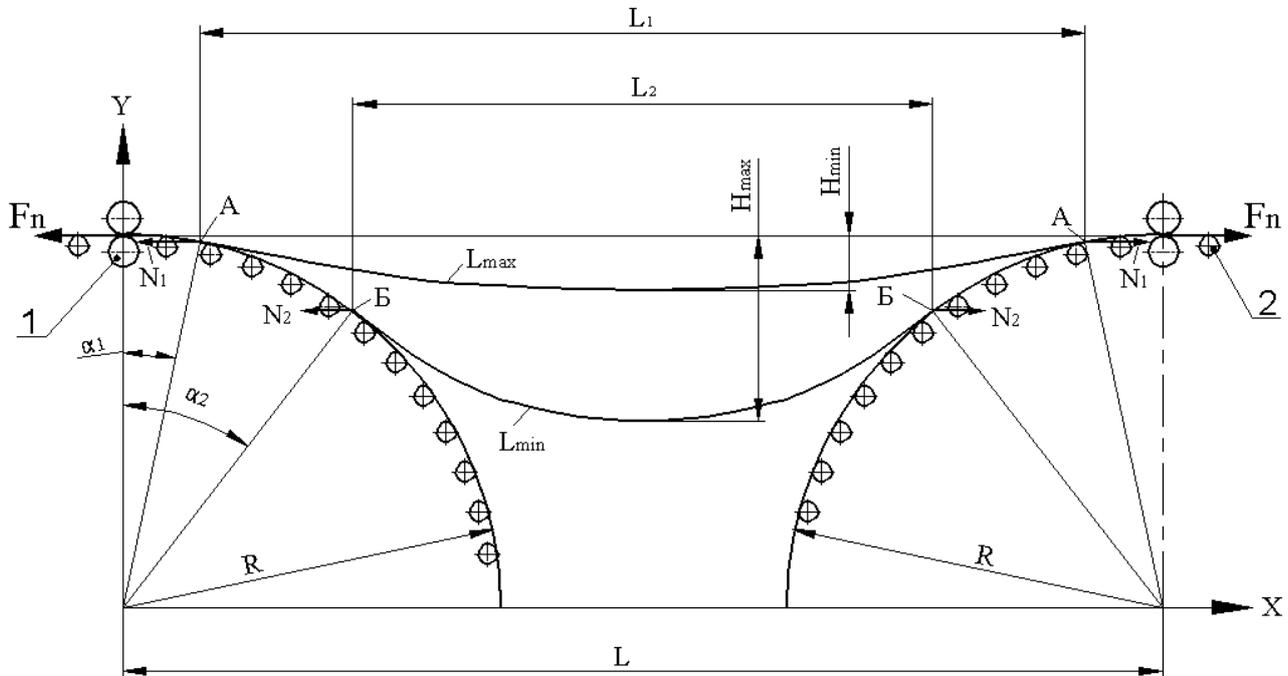


Рис. 1. Расчетная схема петлевого устройства:
1 – тянущие ролики; 2 – ролики рольганга

Работает ПУ следующим образом. Выходящую из одноленточного кристаллизатора непрерывно литую заготовку охлаждающий рольганг транспортирует к первым (входным) тянущим роликам ПУ, а затем заготовка транспортируется рольгангом ПУ к его вторым (выходным) тянущим роликам. После захвата заготовки каждой парой тянущих роликов ПУ ими создаётся нормированное усилие сжатия заготовки, а ролики рольганга ПУ опускаются вниз. В результате между тянущими роликами образуется петля заготовки с минимальным провисанием H_{min} по середине длины L . Для создания запаса длины заготовки в ПУ скорость вращения тянущих роликов на выходе из него уменьшается на некоторое время относительно угловой скорости тянущих роликов на входе в ПУ. В результате между тянущими роликами образуется петля заготовки с максимальным провисанием H_{max} по середине длины L . Накопление заготовки в ПУ происходит за счёт изгиба заготовки на роликах рольганга возле тянущих роликов и разности длин провисающих участков заготовки. После накопления заготовки в ПУ скорости вращения тянущих роликов выравниваются. Заготовка, выходящая из ПУ, транспортируется рольгангом к прокатному стану.

Для проектирования ПУ используем геометрические соотношения из рис. 1, а также известные соотношения из решения задачи об изгибе пластины по цилиндрической поверхности с радиусом R и задачи о поперечном изгибе пластины от собственного веса при её растяжении горизонтальными силами N ($i = 1$ и 2) [7]:

$$L = 2R \sin \alpha_1 + L_1 = 2R \sin \alpha_2 + L_2; \quad 2R\alpha_1 + L_{max} + \Delta L = 2R\alpha_2 + L_{min};$$

$$R = Eh / (2[\sigma_H](1 - \mu^2)); \quad [\sigma_H] = q_2(1 - 1/\operatorname{ch}(u_2))Eh / (2N_2(1 - \mu^2));$$

$$q_1 = L_{\max} q / L_1; q_2 = L_{\min} q / L_2; u_i = k_i L_i / 2; k_i^2 = N_i / EI; I = bh^3 / (12(1 - \mu^2)); \quad (1)$$

$$\alpha_i = q_i [L_i / 2 - sh(u_i) / (k_i ch(u_i))] / N_i;$$

$$(L_i)_{\text{ДЛ}} = \begin{cases} L_{\max}(i=1) \\ L_{\min}(i=2) \end{cases} = \int_0^{L_i} \sqrt{1 + [y_i']^2} dx; y_i' = q_i (L_i / 2 - x) / N_i - q_i sh(u_i - k_i x) / (N_i k_i ch(u_i)),$$

где α_1 и α_2 – углы охвата заготовкой цилиндрических поверхностей с радиусом R при минимальном и максимальном её провисании в ПУ;

L_1 и L_2 – длина горизонтальной прямой между точками свисания A и B заготовки с цилиндрических поверхностей;

$(L_1)_{\text{ДЛ}} = L_{\max}$ и $(L_2)_{\text{ДЛ}} = L_{\min}$ – длина провисающей части заготовки в ПУ, в частности, максимальная и минимальная длина провисающей части заготовки в её крайнем верхнем и в крайнем нижнем положениях в ПУ;

ΔL – требуемый запас длины заготовки в ПУ;

h и b – толщина и ширина заготовки;

E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала заготовки;

$[\sigma_u]$ – допускаемые напряжения изгиба в заготовке:

$$[\sigma_{II}] = \sigma_{0,2} / n_{II}, \quad (2)$$

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала заготовки для её температуры на входе в ПУ;

n_{II} – запас прочности при расчёте изгиба заготовки;

q – погонный вес свисающей части заготовки:

$$q = gbh\rho, \quad (3)$$

ρ – средняя плотность материала заготовки для диапазона её температуры на входе в ПУ и на выходе из него.

Указанная система уравнений позволяет определить следующие восемь неизвестных величин: R , N_2 , α_1 , α_2 , L_1 , L_2 , L_{\max} и L_{\min} . Величина горизонтальной растягивающей силы N_1 назначается из условия:

$$N_1 \leq \sqrt{[F_n]^2 - (qL_{\max})^2} / 4 = \sqrt{(2f_{ck}P)^2 - (qL_{\max})^2} / 4, \quad (4)$$

где $[F_n] = 2f_{ck} \cdot P$ – допускаемое значение тянущей силы, которую может создавать каждая пара тянущих роликов без проскальзывания в них заготовки;

f_{ck} – коэффициент трения скольжения заготовки по тянущему приводному ролику;

P – нормированное усилие сжатия заготовки парой тянущих роликов из условия неповреждения её поверхности [8]:

$$P = \left(\frac{[\sigma_{\text{конт}}]}{0,798} \right)^2 D \left(\frac{1 - \mu^2}{E} + \frac{1 - \mu_*^2}{E_*} \right) b, \quad (5)$$

$[\sigma_{\text{конт}}]$ – допускаемое контактное давление тянущего ролика с заготовкой:

$$[\sigma_{\text{конт}}] = \sigma_{0,2} / (0,56n_k), \quad (6)$$

n_k – запас прочности при расчёте контактного давления;

D – диаметр бочки тянущего ролика;

E^* и μ^* – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала тянущего ролика.

Провисание заготовки H_{max} и H_{min} относительно общей касательной к нижним тянущим роликам составляет:

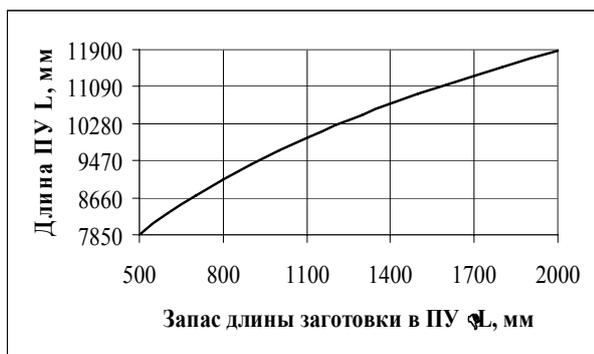
$$\left. \begin{matrix} H_{\min}(i=1) \\ H_{\max}(i=2) \end{matrix} \right\} = q_i \left[(1 - 1/ch(u_i)) / k_i^2 + L_i^2 / 8 \right] / N_i + R(1 - \cos \alpha_i). \quad (7)$$

Положение центра масс $H_{Ц.М.}$ провисающей части заготовки в ПУ относительно общей касательной к нижним тянущим роликам можно определить по формуле:

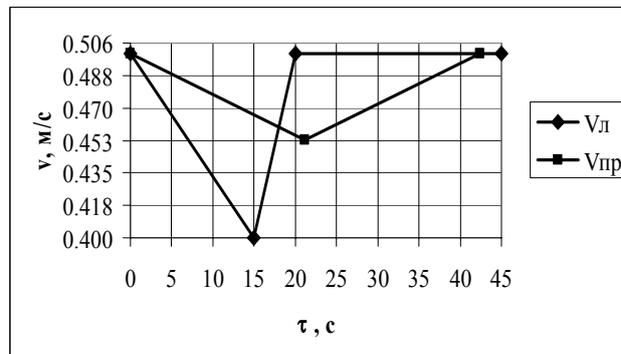
$$H_{Ц.М.}^i = \left\{ \begin{matrix} H_{Ц.М.}^{\min}(i=1) \\ H_{Ц.М.}^{\max}(i=2) \end{matrix} \right\} = R(1 - \cos \alpha_i) + \frac{1}{(L_i)_{ДЛ}} \int_0^{L_i} y_i(x) \sqrt{1 + [y_i']^2} dx; \quad (8)$$

$$y_i(x) = q_i ch(u_i - k_i x) / (N_i k_i^2 ch(u_i)) - q_i / (k_i^2 N_i) + q_i x(L_i - x) / (2N_i). \quad (9)$$

Для численного примера проектирования и расчёта ПУ принимаем следующие исходные данные: $\Delta L = 600$ мм; $h = 10$ мм; $b = 900$ мм; средняя по длине ПУ температура поверхности заготовки 1200 °С; материал заготовки – углеродистая сталь (0,2 % С), для которой по данным [9] $\sigma_{0,2} = 17$ МПа при скорости деформации $\sim 2 \cdot 10^{-3}$, $E = 7566$ МПа и $\rho = 7,48 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³; $\mu = 0,5$; $n_u = 1,1$; $n_k = 1,2$; $f_{ск} = 0,3$ [10]; $D = 250$ мм; $E^* = 2 \cdot 10^5$ МПа и $\mu^* = 0,28$. Тогда по вышеуказанным формулам с помощью численных алгоритмов [11] находим: $R = 3264$ мм; $N_1 = 13837$ Н; $N_2 = 2266$ Н, $\alpha_1 = 9,998^\circ$; $\alpha_2 = 35,409^\circ$; $L_1 = 7739$ мм; $L_2 = 5090$ мм; $L_{max} = 7782$ мм; $L_{min} = 5487$ мм; $H_{max} = 1519$ мм; $H_{min} = 400$ мм; $H_{Ц.М.}^{\max} = 1231$ мм; $H_{Ц.М.}^{\min} = 287$ мм; $L = 8306$ мм (см. рис. 2, а).



а



б

Рис. 2. График зависимости длины ПУ от величины запаса длины заготовки, построенный на основе принятых исходных данных (а) и графики изменения скоростей литья ($V_{л}$) и прокатки ($V_{пр}$) для моделирования движения заготовки в ПУ (б)

Исследуем движение плоской заготовки в ПУ для следующего расчётного случая: за время $\tau_1 = 15$ с скорость литья заготовки линейно уменьшается с номинального значения $v_{л0} = 0,5$ м/с до $v_{л1} = 0,4$ м/с, а затем за время $\tau_2 = 5$ с скорость литья линейно увеличивается до номинальной и остаётся постоянной. Предполагаем, что для этого случая изменения скорости литья целесообразно скорость прокатки линейно уменьшать и восстанавливать с равным по модулю ускорением. Тогда, если в ПУ имеется запас длины заготовки 600 мм,

то скорость прокатки должна линейно уменьшаться с $v_{ПР0} = 0,5$ м/с до $v_{ПР2} = 0,453$ м/с за время $\tau_3 = 21,2$ с (расход запаса заготовки из ПУ в течение времени $\tau_4 \approx 18$ с, а после – накопление заготовки в ПУ), а затем скорость прокатки должна линейно увеличиваться до номинальной также за время $\tau_3 = 21,2$ с (накопление запаса заготовки в ПУ) (см. рис. 2, б и 3, а).

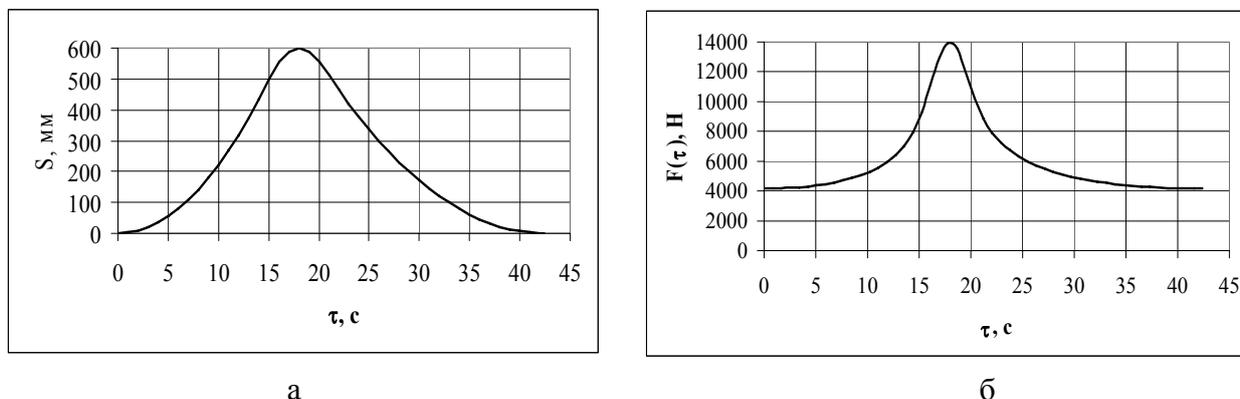


Рис. 3. График изменения запаса длины заготовки в ПУ при изменении скоростей литья и прокатки в соответствии с графиками на рис. 2, б (а) и график изменения тянущей силы $F(\tau)$ при $C_{упр} = 10^6$ Н/м (б)

Найдём изменение в промежутке времени $\tau = [0 \dots 2\tau_3]$ тянущей силы $F(\tau)$, которую должны развивать тянущие ролики ПУ в период регулирования скорости прокатки заготовки в зависимости от принятого изменения её скорости литья (см. рис. 2, б и 3, а).

Предполагаем, что основное влияние на величину силы $F(\tau)$ будет оказывать вертикальное движение в ПУ провисающей части заготовки. Тогда очевидно в период подъёма/опускания провисающей части заготовки в ПУ искомая сила $F(\tau)$ будет определяться из итерационного решения следующего уравнения (см. рис. 3, б):

$$F(\tau) = P(\tau) dH_{ц.м.} / dS,$$

где $P(\tau) = \dot{H}\dot{M} + M(g + \dot{H})$; $M = q(L_i)_{дл} / g$; $q^* = P(\tau) / (L_i)_{дл}$;

$$S = (2R\alpha_2 + L_{min}) - (2R\alpha_i + (L_i)_{дл}) + F(\tau) / C_{упр};$$

$$H_{ц.м.} = H_{ц.м.}^{max} - H_{ц.м.}^i; i = [1 \dots 2\tau_3 / \Delta\tau + 1]; \tau = [0 \dots 2\tau_3].$$

Здесь $P(\tau)$ – результирующая вертикальная сила, действующая на провисающую часть заготовки в зависимости от расхода заготовки S в ПУ (см. рис. 3, а);

$C_{упр}$ – приведённая к месту контакта тянущих роликов с заготовкой жёсткость на кручение элементов привода каждого тянущего ролика на длине между датчиком угла поворота или скорости и бочкой этого ролика;

$\Delta\tau$ – шаг приращения времени τ .

При вычислении значений α_i , $(L_i)_{дл}$ и $H_{ц.м.}^i$ следует подставлять величину q^* .

Для оценки достоверности аналитического определения силы $F(\tau)$ выполнено моделирование процесса подъёма/опускания провисающей части заготовки в ПУ при помощи комплексной конечно-элементной программы «ABAQUS / Explicit», которая реализует явную схему интегрирования уравнений движения упруго-пластичных тел [12] (см. рис. 4 и 5).

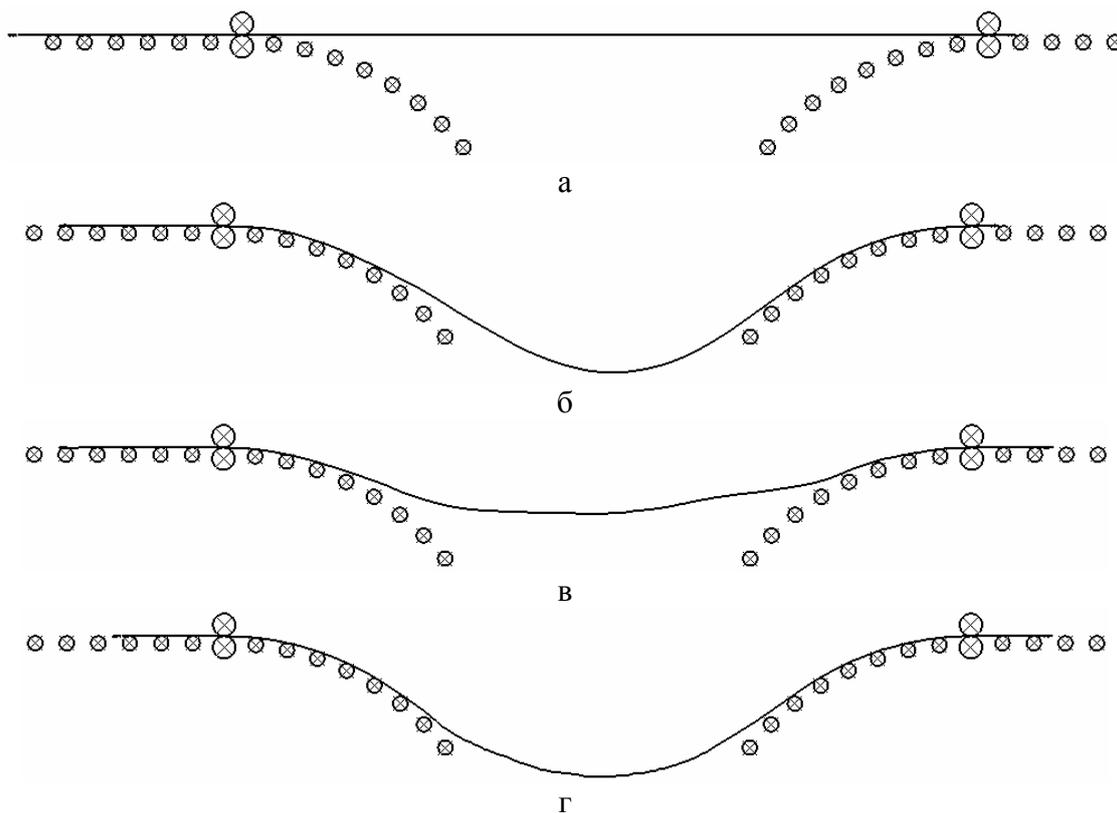


Рис. 4. Этапы моделирования процесса подъёма / опускания провисающей части заготовки в ПУ в программе «ABAQUS / Explicit» на основе принятых исходных данных:

а – начальное положение заготовки в ПУ; б – форма петли после накопления запаса заготовки в ПУ; в – форма петли после расхода запаса заготовки из ПУ; г – форма петли после восстановления запаса заготовки в ПУ

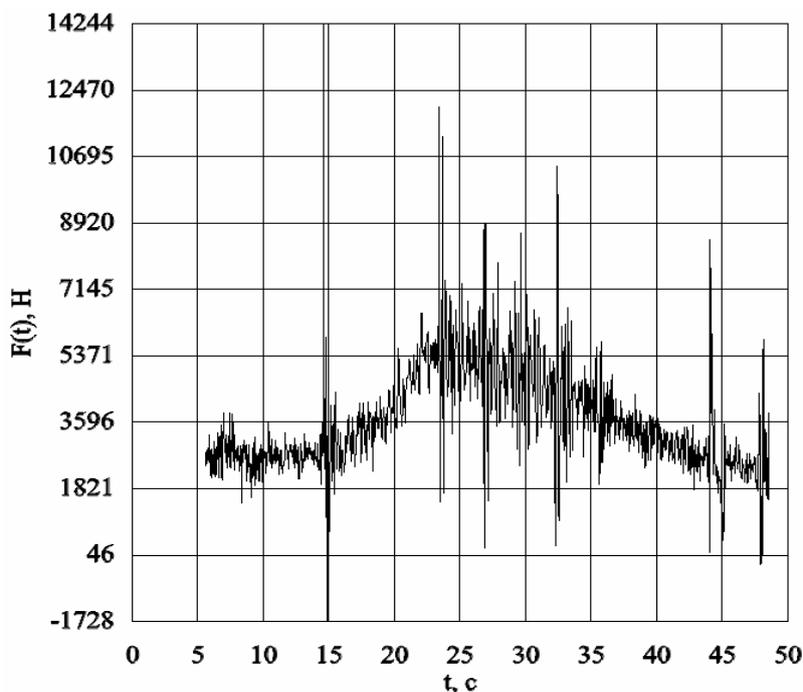


Рис. 5. График изменения тянущей силы $F(t)$ при $C_{упр} = 10^6$ Н/м, который построен программой «ABAQUS / Explicit» при моделировании процесса подъёма / опускания провисающей части заготовки в ПУ на основе принятых исходных данных

Из сравнения графиков на рис. 3, б и 5 следует, что для периода регулирования скоростей литья и прокатки предлагаемый аналитический расчёт изменения тянущей силы $F(\tau)$ определяет её верхнюю границу значений.

При регулировании скоростей литья и прокатки можно исключить повреждения заготовки в ПУ, если выполняется условие:

$$\max F(\tau) \leq [F_n] \text{ при } n_k \geq 1.$$

Для рассматриваемого численного примера вышеуказанное условие будет выполняться практически без уменьшения принятого для проектирования ПУ значения запаса прочности n_k . Если принять $C_{унр} = 0$, то $\max F(\tau) = 15823 \text{ Н}$ и $n_k = 1,13$.

ВЫВОДЫ

Предложена методика проектирования и расчёта петлевого устройства для литейно-прокатного агрегата с одноленточным кристаллизатором, позволяющая на основе анализа различных технологических ситуаций в работе литейно-прокатного агрегата подобрать параметры петлевого устройства, которые обеспечивают возможность регулирования скоростей литья и прокатки без повреждения заготовки в технологической линии литейно-прокатного агрегата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров В. В. Литейно-прокатный агрегат для производства стального горячекатаного листа / В. В. Егоров, А. И. Майоров // АО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2002. – № 1. – С. 28–31.
2. Матвеев Б. Н. Непрерывная отливка тонких полос на микрозаводах с применением валковых кристаллизаторов / Б. Н. Матвеев // Производство проката. – 2004. – № 4. – С. 33–41.
3. Матвеев Б. Н. Исследование процесса производства тонких стальных полос методом непрерывного литья в одноленточный кристаллизатор, совмещенного с непрерывной прокаткой / Б. Н. Матвеев // АО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2007. – № 4. – С. 20–25.
4. Пат. США 7040379. Method and apparatus for the regulation of strip temperature in a continuous metallic strip casting plant (способ и устройство для регулировки температуры полосы в процессе непрерывного валкового литья-прокатки), опубл 09.05.2006.
5. Further results from strip casting with the single-belt process / K. Schwerdtfeger, K.-H. Spitzer, J. Kroos, P. Funke, K.-H. Hower // ISIJ Int. 40 (2000). – № 8. – P. 756–764.
6. Козлов П. Н. Методика расчета времени кристаллизации расплава стали в горизонтальном ленточном кристаллизаторе / П. Н. Козлов, В. В. Савицкий // Вестник ДДМА. – Краматорськ, 2006. – № 1Е (6). – С. 99–105.
7. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. Т. 2. / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1965. – 480 с.
8. Справочник машиностроителя в 6 т. Т. 3 / Под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машигиз, 1955. – 564 с.
9. Машины непрерывного литья заготовок: теория и расчет / Буланов Л. В., Корзунин Л. Г., Парфенов Е. П., Юровский Н. А., Авдонин В. Ю. – Екатеринбург: Уральский центр ИР и рекламы, 2003. – 320 с.
10. Крагельский И. В. Коэффициенты трения: справочное пособие / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова. – М.: Машигиз, 1955. – 188 с.
11. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ / В. П. Дьяконов. – М.: Наука, 1989. – 240 с.
12. Complex of certainly-element general-purpose programs, designed the company «Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc» (HKS, USA). – License № 44 of JSC «NKMZ», November 2003.