На рис.1 приведены зависимости величины u_3 от пространственной координаты α_2 в сечении $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$. В области крепления ребер максимальный прогиб оболочки u_3, в сравнении с прогибом в гладкой области, меньший приближенно в три раза.

На рис.2 изображена зависимость величины T_{11} от пространственной координаты α_2 в сечении $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$. В области крепления ребер максимальное усилие оболочки T_{11}, в сравнении с усилием в гладкой области, меньше приближенно в пять раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. ***Амиро И.Я.*** Динамика ребристых оболочек / Амиро И.Я., Заруцкий В.А., Паламарчук В.Г. – К.: Наук. думка, 1983. – 204с.
2. ***Амиро И.Я***. Колебания ребристых оболочек вращения / Амиро И.Я., Заруцкий В.А., Ревуцкий В.Н. – К.: Наук. думка, 1988. – 171 с.
3. ***Амиро И.Я.*** Учет дискретного размещения ребер при изучении напряженно – деформированного состояния, колебаний и устойчивости ребристых оболочек (обзор) / И.Я. Амиро, В.А. Заруцкий // Прикл. механика. – 1998. – Т. 34, № 4. – С. 3 – 22.
4. ***Луговой П.З.*** Нестационарная динамика неоднородных оболочечных конструкций / Луговой П.З., Мейш В.Ф., Штанцель Э.А. – К.: Издательско-полиграфический центр “Киевский университет”, 2005. – 536 с.
5. ***Мейш В.Ф.*** Исследование напряженно-деформированного состояния дискретно подкрепленных продольными ребрами эллипсоидальных оболочек при нестационарных распределенных загрузках / В.Ф. Мейш, Н.В. Майбородина // Теоретическая и прикладная механика – 2007. – Вып. 43. – С. 150 – 155.
6. ***Мейш В.Ф.*** К расчету неосесимметричных колебаний дискретно подкрепленных поперечными ребрами гибких эллипсоидальных оболочек при нестационарных нагрузках/В.Ф.Мейш, Н.В. Майбородина // Прикл. механика. – 2008. – Т. 44, № 10. – С. 63 – 73.
7. ***Самарский А.А.*** Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656с.

УДК 621.771.01

МАКСИМЕНКО О. П., д-р техн.наук, профессор
НИКУЛИН А. А., инженер
НИКУЛИН А. В., к-т техн.наук, доцент

Днепродзержинский государственный технический университет
ПАО «ДМКД»

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ПРОКАТКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Результаты теоретического анализа устойчивости прокатки с помощью теоремы об изменении кинетической энергии и по методу наименьшего сопротивления дают обоснование выведенного с помощью дифференциального метода предельного условия (критерия) захватывающей способности валков.

Анализ выведенной формулы показывает, что при исследовании устойчивости высокоскоростных процессов прокатки будут установлены их качественные отличия от процессов с малыми скоростями.

Results of theoretical analysis of stability of rolling by means of theorem about the change of kinetic energy and on the method of the least resistance give the ground of the maximum condition (criterion) of keen ability of rollers shown out by means of differential method.The analysis of the shown out formula shows that at research of stability of high-speed processes of rolling their high-quality differences will be set from processes with small speeds.

Введение. Модернизация металлургического производства предполагает переход к технологиям, позволяющим, в частности, сделать процессы обработки металлов давлением более регулируемыми. Это могут быть технологии прокатки, базирующиеся на более полном использовании сил трения в очаге деформации. В результате прокатные клети можно использовать не только для деформации полосы в очаге, но и для ее проталкивания через последующие клети, т.е. для улучшения условий захвата полосы и повышения устойчивости процесса. Такой подход дает возможность полнее использовать энергию приводных валков с ориентацией на энергосбережение при прокатке. Поэтому актуальны проблемы качественного объяснения и количественного уточнения исследуемых параметров и применяемых характеристик для установившегося процесса обработки на основе методов теории ОМД и механики сплошной среды [1,2].

Постановка задачи. Ранее в качестве критерия реализуемости (устойчивости) установившегося процесса продольной прокатки предложено использовать [2] среднее значение равнодействующей горизонтальных сил:

$$Q_{cp}^{*} = \frac{1}{\alpha_y}\int_{0}^{\alpha_y} Q_x^{*} d\varphi, \tag{1}$$

где α_y - угол захвата при установившемся процессе;

φ - текущий угол захвата в очаге деформации;

Q_{cp}^{*} - текущая равнодействующая горизонтальных сил.

В безразмерной форме Q_{cp}^{*} определяется [2] по формуле:

$$Q_x^{*} = \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{t_x \cos\varphi - p_x \sin\varphi}{\beta\sigma_s} d\varphi, \tag{2}$$

где $\beta\sigma_s$ - средний вынужденный предел текучести;

p_x, t_x - нормальная и касательная составляющая контактных напряжений.

Очевидно, что в установившемся процессе прокатки происходит изменение количества движения полосы, оно должно увеличиваться при пропуске под действием продольных сил. Анализируя изменение текущей равнодействующей в очаге деформации Q_x^{*} и ее среднего значения Q_{cp}^{*} вследствие изменения технологических параметров, установлено, что условия прокатки весьма близки к предельным, если на эпюре Q_x^{*} по длине очага при отрицательном и положительном значении силы практически равны, а сила Q^*_{cp} мала по модулю, т.е. ее можно считать нулевой [2]. Принимается, что критическое значение $Q^*_{cp}= 0$. Пробуксовка (потеря устойчивости) возникает в условиях, когда расчетное значение Q^*_{cp} становится отрицательным.

Обратим внимание на то, что средняя результирующая горизонтальных сил Q^*_{cp} никакими внешними силами в очаге деформации при простом случае прокатки не уравновешивается. По-видимому, она связана с пластической деформацией и ускорением частиц металла в зоне контакта полосы с валками. Покажем, что при анализе силового взаимодействия в очаге деформации с помощью энергетических методов это предположение является адекватным. Для изотерической задачи теории пластичности применяем теорему об изменении кинетической энергии и энергетические принципы, в частности, уравнение баланса мощностей.

Полученные результаты. В соответствии с теоремой об изменении кинетической энергии:

$$\frac{dE}{dt}=\frac{dA^{(i)}_{\text{пов}}}{dt}+\frac{dA^{(\mathrm{e})}_{m}}{dt}+\frac{dA^{(e)}_{\text{пов}}}{dt}, \tag{3}$$

где E – кинетическая энергия пластически деформируемого тела;

$dA^{(i)}_{\text{пов}}$ – работа внутренних поверхностных сил;

$dA^{(\mathrm{e})}_{m}$ – работа внешних массовых сил;

$dA^{(e)}_{\text{пов}}$ – работа внешних поверхностных сил,

а также после использования формул, определяющих составляющие уравнения (3), получим [3]:

$$\frac{1}{2}\iiint\limits_{Vo.\partial}\rho(1-\frac{1}{\lambda^2})\frac{\upsilon_1^3F_1}{V_{o.\partial}}dV=-\iiint\limits_{Vo.\partial}\sigma_{ij}\xi_{ij}dV+\iiint\limits_{Vo.\partial}\rho f_i\upsilon_i dV+\iint\limits_{S_p}\sigma_{ij}n_j\upsilon_i dS, \tag{4}$$

где ρ – объемная плотность;

$V_{o.\partial}$ – очаг деформации и его объем;

$\lambda=\dfrac{\upsilon_1}{\upsilon_0}$ – коэффициент вытяжки;

F_1 – площадь поперечного сечения полосы после прохода;

σ_{ij} – компоненты тензора напряжений;

ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформации;

f_i – компоненты вектора массовых сил;

n_j – компоненты вектора нормали к поверхности;

υ_i – компоненты вектора скорости;

S_p – поверхность очага деформации.

Далее на основе уравнения (4) следует формулировать и решать вариационную задачу. Однако некоторые предварительные оценки можно получить, упрощая модель при переходе к усредненным величинам. Для начала с ориентацией на практическое использование целесообразно привести математическую модель к виду, позволяющему менее опосредованно исследовать взаимосвязь между технологическими параметрами процесса и получить практически значимые результаты. При проведении исследования и получении первого приближения решения задачи в интегральной форме естественным является энергетический метод в виде уравнения баланса мощностей прокатки:

$$N_в = N_ф + N_{тр} + N_1, \qquad (5)$$

где $N_в$ – мощность, отдаваемая валками при прокатке;

$N_ф$ – мощность, затраченная на формоизменение;

$N_{тр}$ – мощность, затраченная на силы трения при прокатке;

N_1 – мощность переднего подпора.

Для того, чтобы воспользоваться формулой (4) и ее приближением, перепишем уравнение (5) в эквивалентном виде:

$$N_в – N_{тр} = N_ф + N_1. \qquad (6)$$

Причем составляющим уравнения (6) в соответствии с их физическим смыслом приравниваем составляющие выведенного ранее энергетического уравнения:

$$N_в - N_{тр} = \iint_{S_p} \sigma_{ij} n_j \upsilon_i dS = \iint_{S_p} p_i \upsilon_i dS;$$

$$N_ф = \iiint_{V_{о.д.}} \sigma_{ij} \xi_{ij} dV;$$

$$N_1 = \frac{1}{2} \iiint_{V_{о.д.}} \rho (1 - \frac{1}{\lambda^2}) \frac{\upsilon_1^3 F_1}{V_{о.д.}} \mathrm{dV}.$$

Далее принимаются обычные для теории прокатки допущения:

$\rho = \mathrm{const}$;

$\rho f_i \approx 0$, т.е. действием массовых сил пренебрегаем;

$\upsilon_1 = \upsilon_b (1 + S)$, где S – опережение;

$\upsilon_1 F_1 = \upsilon_b F_\gamma$ – условие постоянства секундных объемов;

$F_\gamma = h_\gamma b$ – площадь нейтрального сечения;

Затем в уравнении (6) мощности выражам через параметры процесса прокатки с учетом равнодействующей горизонтальных сил, получим:

$$N_b - N_{тр} = \iint_{S_p} \rho_i \upsilon_i dS \approx 2\beta \sigma_s b R Q_{cp}^* \upsilon_b,$$

т.к. из поверхностных напряжений действующими являются контактные напряжения на поверхностях контакта полосы и валков;

$$N_ф = \iiint_{V_{о.д.}} \sigma_{ij} \xi_{ij} dV = C \sigma_s \upsilon_b h_\gamma b \ln \frac{h_0}{h_1},$$

мощность формоизменения в направлении прокатки, С – коэффициент пропорциональности;

$$N_1 = \frac{1}{2} \rho h_\gamma b (1 - \frac{1}{\lambda^2})(1 + S)^2 \upsilon_b^3,$$

составляющая мощности из уравнения баланса, которая одновременно учитывает и динамику процесса, а также характеризует всегда имеющийся в установившемся процессе передний подпор, т.к. полоса при прокатке ускоряется.

После подстановки приближений в уравнение (6) при С=1 и преобразований получится [4]:

$$Q^*_{\text{ср}} = \frac{1}{2\beta}\cdot\frac{h}{R\alpha_y}\cdot\ln\frac{h_0}{h_1} + \frac{\rho}{4\beta\sigma_s}\cdot\frac{h_\gamma}{R\alpha_y}(1-\frac{1}{\lambda^2})\cdot(1+S)^2\upsilon_b^2\,, \tag{7}$$

где $h_\gamma = h_1 = 2R(1-\cos\gamma) \approx h_1 + R\gamma^2$ – высота полосы в нейтральном сечении.

Из выведенной формулы следует, что для устойчивости процесса прокатки по энергетическим представлениям Q^*_{cp}>0 (при Q^*_{cp}<0 процесс энергетически невозможен). Следовательно, предельные условия прокатки при установившемся процессе будут при Q^*_{cp}=0, что соответствует результатам, установленным для дифференциальной модели, и дает им энергетическую трактовку. В правой части формулы (7) два слагаемых, первое из которых оценивает долю расхода энергии на пластическую деформацию, а второе – на динамику процесса. Это второе слагаемое мало при малых скоростях прокатки, а при увеличении скорости на порядок оно растет на два порядка, т.к. зависимость – квадратичная. Можно ожидать, что при исследовании устойчивости высокоскоростных процессов прокатки будут установлены их качественные отличия от процессов с малыми скоростями.

Выводы. Уточнена методика определения предельных углов захвата в установившемся процессе прокатки. С помощью энергетического метода, представленного уравнением баланса мощностей при прокатке, показано, что для обеспечения устойчивости процесса прокатки должна действовать положительная средняя результирующая горизонтальных сил Q^*_{cp}>0 (т.е. сила действует в направлении движения полосы). При нулевом значении этой силы Q^*_{cp}=0 наступают предельные условия прокатки (буксование). При решении вариационной задачи, порождаемой функционалом, соответствующим уравнению (4), можно ожидать уточнения получаемых приближений по сравнению с методом баланса мощностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А.П. Захватывающая способность прокатных валков / А.П. Грудев. – М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1988. – 283 с.

2. Максименко О.П. Новый метод оценки захватывающей способности валков / О.П. Максименко, А.В. Никулин, А.А. Никулин // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки) Дніпродзержинськ: ДДТУ – 2008. – С.60-67.

3. Коковихин Ю.И. Динамика установившихся процессов обработки металлов давлением / Ю.И. Коковихин , А.В. Никулин // Известия вузов. Черная металлургия, 1994, №5. – С.36-37.

4. Никулин А.А. Переходы в системе моделей при исследовании их адекватности // Проблеми та шляхи вдосконалення економічного механізму підприємницької діяльності. Збірник наукових праць 2 Міжнародної наукової конференції., 18-19 березеня 2010р. – В 4т.-Т.4.-Дніпропетровськ: Біла К.О., 2010. – С.117-120.