

РОЗДІЛ «ПРОКАТНЕ ВИРОБНИЦТВО»

УДК 621.771.01

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., професор
 ИЗМАЙЛОВА М.К., к.т.н., доцент
 ЛОБОЙКО Д.И., аспирант
 АТАМАСЬ А.В., магистр

Днепродзержинский государственный технический университет

АНАЛИЗ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ПРИ НОВОЙ МОДЕЛИ ТРЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ

Введение. В работах [1-3] приведено несколько моделей распределения удельных сил трения в очаге деформации. Они относятся к разряду подходящих функций и физического обоснования не имеют.

В настоящем исследовании предложена модель распределения удельных сил трения и предпринята попытка ее обоснования с позиции современной теории прокатки. Мысленно представим процесс прокатки как осадку в направлении оси, проходящей под углом $\frac{\alpha}{2}$ (α – угол захвата) к вертикали, с последующей транспортировкой металла из очага деформации как упругого тела.

Постановка задачи. Выделим элемент металла в виде треугольной призмы (рис.1) и рассмотрим его равновесие в условиях осадки. Предположим, что деформация является плоской и взаимно-перпендикулярные грани призмы являются главными площадками. В этом случае на гранях призмы будут действовать главные нормальные напряжения σ_1 и σ_3 , а на контактной поверхности, являющейся наклонной площадкой, – нормальное давление p_x и касательное напряжение τ_{oc} .

Условие равновесия элемента имеет вид:

$$\begin{cases} \sigma_1 \sin \varphi dl - p_x \sin \varphi dl + \tau_{oc} \cos \varphi dl = 0 \\ \sigma_3 \cos \varphi dl - p_x \cos \varphi dl - \tau_{oc} \sin \varphi dl = 0 \end{cases}$$

Вычитая второе выражение из первого и учитывая уравнение пластичности, имеем:

$$\tau_{oc} = \frac{1}{2} 2k \sin 2\varphi.$$

При выделении элемента справа от оси 3-3 касательное напряжение τ_{oc} изменит свое направление, т.к. пластическое течение металла направлено в противоположную сторону. Конечное выражение для определения τ_{oc} справа от оси 3-3 имеет вид, аналогичный выше приведенному уравнению. Если принять за начало отсчета ось 0-0 (рис.1), то получим одно уравнение, описывающее изменение удельных сил трения на контакте при осадке металла валками:

$$\tau_{oc} = \frac{1}{2} 2k \sin 2\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right), \quad (1)$$

где $2k$ – сопротивление деформации металла;
 φ – текущий угол в очаге деформации.

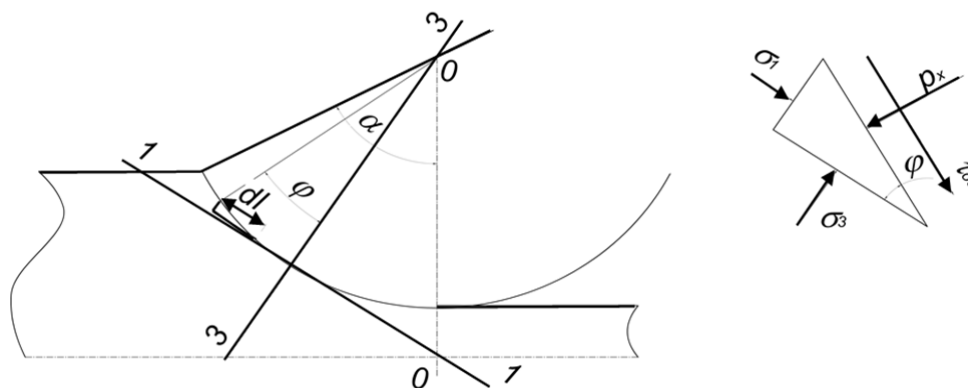


Рисунок 1 – Схема сил, приложенных к элементарной призме

Выделим вторую составляющую трения, связанную с транспортированием через очаг деформации предварительно сформированных элементов металла. Пусть эта составляющая зависит от скольжения и определяется законом Амонтона-Кулона, т.е.

$$\tau_{mp} = f_y p_x, \quad (2)$$

где f_y – коэффициент трения.

Тогда удельная сила трения t_x в зоне контакта полосы с валками определяется:

$$t_x = \tau_{mp} + \tau_{oc} = f_y p_x + \frac{1}{2} 2k \sin 2\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right). \quad (3)$$

Следует подчеркнуть, что представленная модель распределения удельных сил трения в определенной мере соответствует уравнению К.Н.Шевченко, приведенному в [4].

Проведем проверку на соответствие выражения (3) предельным условиям прокатки. Из теории известно, что предельная захватывающая способность валков возникает при $\alpha = 2f_y$. В этом случае очаг деформации представляет собой только зону отставания, и удельные силы трения на выходе металла из валков равны нулю. В первом приближении, принимая $\sin 2\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right) \approx 2\left(\varphi - \frac{\alpha}{2}\right) \text{ рад}$ и учитывая граничные условия на выходе металла из валков для давления ($p_x = 2k$) и для удельной силы трения в предельном случае прокатки ($t_x = 0$), из уравнения (3) получаем $\alpha = 2f_y$. Как видно, выражение (3) отражает предельное условие прокатки в установившемся режиме.

Вводя во второй член выражения (3) коэффициент $n_1 = \left(\frac{2f_y}{\alpha}\right)^2$, из последнего можно получить известное в теории уравнение для определения угла нейтрального сечения.

Проведенный анализ показывает, что предлагаемая модель трения соответствует предельным и кинематическим условиям прокатки.

В книге [5] А.П.Грудев сделал замечание в отношении формулы К.Н.Шевченко, связанное с тем, что произведение $f_y p_x$ составляет только часть от общей удельной силы трения. Поэтому в уравнение (3) дополнительно были введены коэффициенты n_2 и n_3 . Заметим, что эти коэффициенты по величине меньше единицы. Конкретные значения их определяются из граничных условий при решении дифференциального уравнения Т.Кармана. Окончательно предлагаемая модель распределения удельных сил трения в очаге деформации при прокатке приобретает вид:

$$\frac{t_x}{2k} = n_2 f_y \frac{p_x}{2k} + \frac{1}{2} \sin \left[2n_1 \left(n_3 \varphi - \frac{\alpha}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

Решим уравнение Т.Кармана при модели трения, определяемой предложенной формулой и законом Амонтона-Кулона ($t_x = f_y p_x$), и сравним полученные результаты по среднему давлению p_{cp} с экспериментом. Кроме того, исследуем продольную устойчивость процесса с учетом модели (4) и натяжения полосы, например, в условиях чистовой группы клетей стана 1680. При анализе режим обжатий, усилие прокатки, среднее давление, натяжение полосы между клетями и другие параметры взяты из книги [6] и приведены в табл.1. Заметим, что устойчивость прокатки определяли при разных удельных натяжениях полосы ($q_{0i} = m \frac{\sigma_{0i}}{2k}$; $q_{1i} = m \frac{\sigma_{1i}}{2k}$, σ_{0i} и σ_{1i} – заднее и переднее удельное натяжение по клетям чистовой группы). Варьирование удельных натяжений обеспечивали с помощью коэффициента m (значение m приняли равными 1; 5 и 10).

Таблица 1 – Режим обжатий, натяжений и энергосиловые параметры горячей прокатки в непрерывной группе клетей стана 1680

	№ клетки						
	5	6	7	8	9	10	
$h_1, \text{мм}$	13,62	8,33	5,61	4,28	3,37	3	
$\varepsilon, \%$	49,8	38,8	32,6	23,3	21,3	11	
$\alpha_y, \text{рад}$	0,209	0,131	0,0944	0,066	0,055	0,035	
$V_g, \text{м/с}$	1,89	3,08	4,6	6,03	7,66	8,6	
$P_{on}, \text{МН}$	12,33	10,75	12,57	10,67	9,53	4,55	
$p_{cp}, \text{МПа}$	140	142	302	344	369	271	
f_y	0,25	0,234	0,185	0,171	0,16	0,12	
$t, \text{°C}$	1012	1000	996	970	925	900	
$l_{cпл}, \text{мм}$	63,88	40,17	30,5	22,1	18,8	12,3	
Средний предел текучести $\sigma_{Tcp}, \text{МПа}$	97	122	131	138	154	162	
q_{0i}	$m=1$	0	0,04	0,04	0,05	0,03	0,02
	$m=5$	0	0,2	0,2	0,25	0,15	0,1
	$m=10$	0	0,4	0,4	0,5	0,3	0,2
q_{1i}	$m=1$	0,04	0,04	0,05	0,03	0,02	0,01
	$m=5$	0,2	0,2	0,25	0,15	0,1	0,01
	$m=10$	0,4	0,4	0,5	0,3	0,2	0,01

Примечание: P_{on} и p_{cp} – опытные значения усилия прокатки и среднего давления

Результаты работы. Расчетные и опытные значения среднего давления приведены в табл.2. Анализ полученных результатов показывает, что решение дифференциального уравнения равновесия Т.Кармана при удельных силах трения, заданных в виде модели (4), дают значения среднего давления гораздо ближе к экспериментальным дан-

ным по сравнению с тем случаем, когда удельные силы трения заданы в виде $t_x = f_y p_x$.

Таблица 2 – Расчетные и опытные значения среднего давления по клетям чистовой группы стана 1680

№ клетки	Среднее давление $p_{cp}, МПа$		Результаты опытов	Относит. ошибка, %	
	Расчетные значения			согласно ф-лы (4)	согласно $t_x = f_y p_x$
	согласно модели (4)	согласно $t_x = f_y p_x$			
5	132	125	140	5,7	10,7
6	192	175	170	9,4	3,3
7	273	179	302	9,6	40,7
8	292	205	344	15,1	40,4
9	310	242	369	16	34,4
10	262	193	271	3,3	28,8

Примечание: расчеты выполняли при минимальном удельном натяжении

Анализ результатов табл.2 показывает, что в первом случае относительная ошибка $\left| \frac{p_{cp\ on} - p_{cp\ p}}{p_{cp\ on}} \cdot 100\% \right|$ составляет в зависимости от номера прохода от 3,3 до 15%. В

случае использования модели трения в виде $t_x = f_y p_x$ относительная ошибка колеблется от 3,3 до 40,7%. Таким образом, двухзвенная модель трения (4) более точно характеризует контактные условия при определении среднего давления металла на валки.

Следующий этап исследования состоял в оценке продольной устойчивости процесса прокатки по клетям чистовой группы стана 1680. При проведении этой работы пользовались методикой, приведенной в статье [7]. В результате при новой модели трения получили эпюры распределения контактных напряжений, определили изменение продольных нормальных напряжений $\frac{\sigma_x}{2k}$ по длине очага деформации и рассчитали текущее значение продольной силы пластически деформированного металла в безразмерном виде:

$$Q_{xnp}^* = \frac{\sigma_x}{2k} + \left(\frac{h_l}{R} + \varphi^2 \right),$$

после чего определяли результирующую продольных сил:

$$Q_{cpnp}^* = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha Q_{xnp}^* d\varphi.$$

Затем оценили устойчивость полосы в очаге деформации каждой из клеток чистовой группы стана. Для примера определили результирующую силу Q_{cpnp}^* для шестой клетки стана. Результаты расчетов приведены в виде эпюр на рис.2. Заметим, что

$\frac{p_x}{2k}, \frac{t_x}{2k}, Q_{xnp}^*$ находили при удельном заднем и переднем натяжении, равном

$$Q_{0_6} = Q_{1_6} = 0,2.$$

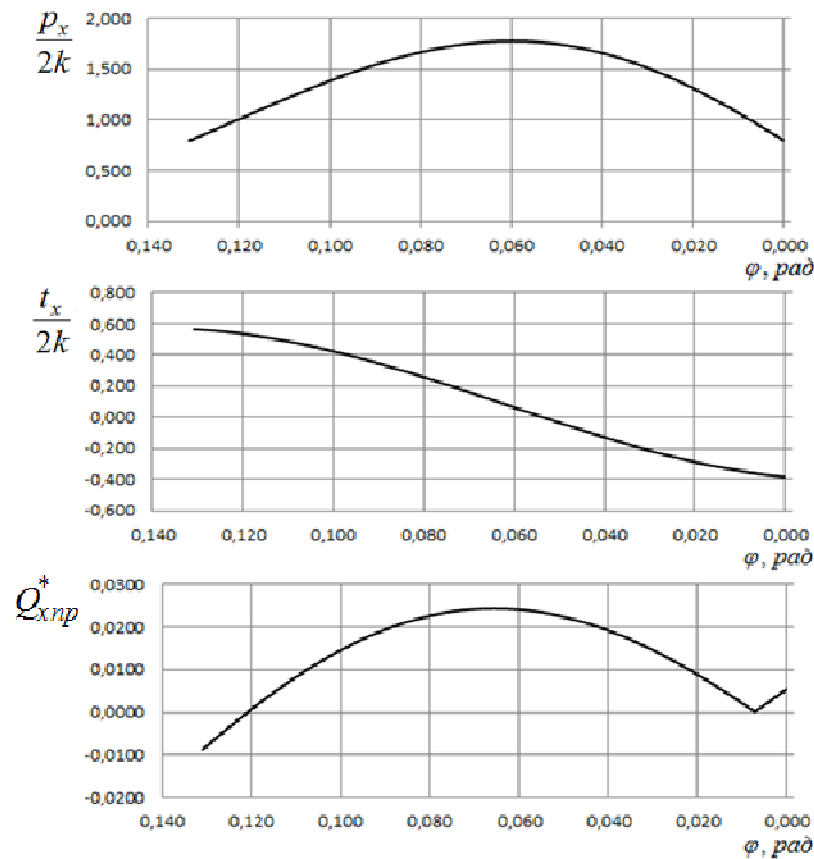


Рисунок 2 – Теоретические эпюры распределения контактных напряжений и текущей продольной силы при прокатке с натяжением

Из анализа графика изменения текущей силы Q_{xnp}^* по длине очага деформации видно, что площадь под этой кривой в начале очага деформации является отрицательной, т.к. сила заднего натяжения Q_{0_6} направлена против движения полосы. На остальной части очага деформации она положительна, в том числе и на выходе из очага деформации (Q_{l_6} – направлена по ходу прокатки). Как видно, результирующая сила $Q_{срnp}^* > 0$, что согласно [7] свидетельствует об устойчивости процесса прокатки в шестой клетки при приведенном выше режиме натяжения. Аналогично были выполнены расчеты для остальных клеток чистовой группы стана. Результаты выполненной работы приведены на рис.3. Как видно, суммарная результирующая продольная сила по всем клетям $\Sigma Q_{срnp}^*$ зависит от режима натяжения полосы. С увеличением натяжения эта сила уменьшается, а, следовательно, продольная устойчивость полосы снижается. Таким образом, одним из ограничений при выборе режима натяжения является продольная устойчивость процесса прокатки.

Выводы. Разработана новая модель трения для определения контактных касательных напряжений в очаге деформации, которая соответствует предельным условиям прокатки и кинематике процесса. Проанализирована продольная устойчивость полосы в валках при непрерывной прокатке с натяжением. Показано, что с увеличением удельного натяжения полосы в чистовой группе клеток тонколистового стана 1680 уменьшается значение результирующей продольных сил, что снижает продольную устойчивость

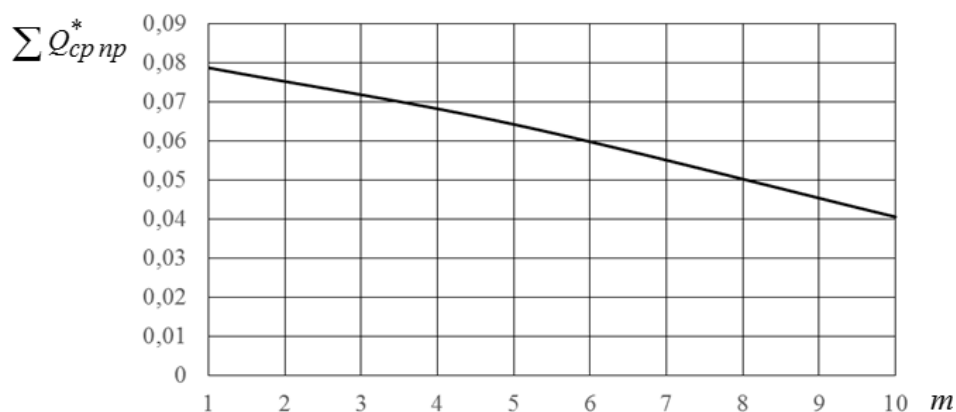


Рисунок 3 – Залежність сумарної результуючої продольних сил від натяження полоси

полоси. Следовательно, одним из ограничений при выборе режима натяжения металла является продольная устойчивость полосы в валках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенюта А.Я. Определение удельных давлений при прокатке широких полос средней толщины / А.Я.Семенюта // Обработка металлов давлением: научные труды ДМетИ. – М.: Metallurgizdat, 1967. – Т52. – С.118-123.
2. Семенюта А.Я. Определение положения нейтральной линии при прокатке полосы средней толщины / А.Я.Семенюта // Обработка металлов давлением: научные труды ДМетИ. – М.: Metallurgizdat., 1971. – Т57. – С.162-166.
3. Деркач В.А. Численный анализ напряженного состояния прокатываемого металла с помощью ЭЦВМ / В.А.Деркач, М.А.Зайков, В.С.Целуйков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1968. – №10. – С.87-92.
4. Шевченко К.Н. Закон трения при прокатке и другие замечания / Шевченко К.Н. // Теория прокатки: конф. по теоретическим вопросам прокатки, 1962 г.; материалы конф. – М.: Metallurgizdat, 1962. – С.459-461.
5. Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке / А.П.Грудев. – М.: Metallurgizdat, 1973. – 288с.
6. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали / М.М.Сафьян. – М.: Металлургия, 1969. – 460с.

Поступила в редколлегию 26.05.2014.

УДК 621.771.2-5

МЕЩАНИНОВ С.К. д.т.н., професор
БАГРІЙ В.В., к.т.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет

КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ПОПЕРЕЧНО-ПРОФІЛЬНОЇ ПРОКАТКИ

Вступ. Для отримання деталей типу ступінчастих валів, осей, штифтів, шпильок, роликів підшипників і так далі розроблено та застосовуються автоматизовані комплекси поперечно-профільної прокатки (ППП), які об'єднують усі операції технологічного процесу в єдиний керований ланцюг [1, 2]. Ефективність і конкурентоспроможність такої технології в порівнянні з обробкою різанням залежить від підвищення коефіцієнта використання металу та продуктивності.

Постановка задачі. Досягненню поставлених цілей сприяє широка автоматизація технологічного процесу на основі застосування автоматизованих модулів обладнання, мікропроцесорної техніки.

Метою роботи є підвищення коефіцієнта використання металу та продуктивності автоматизованих комплексів на основі розроблених стратегій управління, які потребують встановлення обґрунтованого критерію ефективності та методів взаємозв'язку підсистем.

Результати роботи. Встановити взаємозалежність між перерахованими критеріями в аналітичній формі у край складно, тому шляхом їх формального об'єднання на основі формування функції корисності пропонується складений узагальнений мультипликативний критерій:

$$J = V \cdot K = \frac{L - L_{втр} \pm L_{под}}{t_{обр} \cdot l_{дет}} \cdot \frac{L - L_{втр} \pm L_{под}}{L}, \quad (1)$$

де V – відносна швидкість виходу придатного прокату з початкового матеріалу;
 K – коефіцієнт використання матеріалу; L – довжина дроту в початковому бунті, м;
 $L_{втр}$ – сумарні втрати матеріалу, м; $l_{дет}$ – довжина прокатої деталі, м;
 $L_{под}$ – сумарне подовження прутка внаслідок пластичної деформації;
 $t_{обр}$ – сумарні витрати часу на обробку, с.

Сумарні втрати матеріалу в процесі прокатки можна оцінити виразом:

$$L_{втр} = \sum_{i=1}^n \Delta l_i + \sum_{j=1}^N \Delta l_{обрj} + \sum l_{бр}, \quad (2)$$

де Δl_i – довжина відрізного відходу при прокатці i -тої деталі ($i=1..n$);
 n – кількість прокатаних деталей;
 $\Delta l_{обрj}$ – довжина обрізи на кожному j -тому мірному прутку ($j=1..N$);
 N – кількість мірних прутків в бунті дроту;
 $\sum l_{бр}$ – сумарний брак, пов'язаний з перевищенням допуску на розміри готових деталей.

Час, витрачений на виконання усіх необхідних технологічних операцій на автоматичному комплексі ППП,:

$$t_{обр} = \sum_{i=1}^n t_{0i} + \sum_{j=1}^N (t_{nzj} + K_n \cdot t_{мпj}), \quad (3)$$

де t_{0i} – час повного циклу прокатки i -тої деталі у валковому інструменті, с;
 t_{nzj} – час перезавантаження механізму подачі j -тим мірним прутком, с;
 $t_{мпj}$ – час транспортування j -го мірного прутка до цанги механізму подачі, с;
 K_n – коефіцієнт що враховує перекриття операцій транспортування і прокатки j -го прутка.

Час повного циклу прокатки деталі визначається частотою обертання валкового інструменту:

$$t_{0i} = 1/\omega_i, \quad (4)$$

де ω_i – частота обертання валкового інструменту.

За час повного циклу відбувається послідовне поєднання усіх ділянок клинів валкового інструменту в точці, розташованій на осі установки механізму подачі, чим і задаються обмеження на час виконуваних ним операцій. При поєднанні завантажувальних ділянок, які характеризуються заниженням радіусу нижче за нульову робочу пове-

рхню валків, механізм подачі забезпечує переміщення прутка упоперек валкового інструменту на необхідну довжину за час, обмежений умовою

$$t_{inod} \leq \varphi / (2 \cdot \pi \cdot \omega), \quad (5)$$

де φ – центральний кут, відповідний завантажувальній ділянці на валковому інструменті.

Експериментально встановлено, що величина помилки подачі залежить від величини кінетичної енергії, яку має пруток в кінцевій точці позиціонування. У момент зупинки динамічне зусилля, прикладене до прутка, перевищує силу зчеплення його з цангою, і спостерігається прослизання прутка відносно цанги. Надлишок довжини подачі на кожній деталі віддаляється ножами валкового інструменту як відрізний відхід Δl_i . В ході прокатки маса прутка зменшується у міру його вироблення, що призводить і до зменшення величини помилки подачі.

Час перезавантаження механізму подачі мірним правленим прутком t_{nzj} в автоматичному режимі роботи комплексу складає 2-5 с і витрачається на виконання операцій установки цанги у фіксоване положення перед перезавантаженням, на перезавантаження з наступною синхронізацією початкового положення прутка і завантажувальних ділянок на валковому інструменті.

Час транспортування мірного правленого прутка до цанги механізму подачі t_{mpj} визначається частотою обертання транспортувальних роликів правильно-відрізного автомата. Діапазон зміни швидкості правки обмежений певним співвідношенням між частотою обертання правильної рамки та швидкістю подачі, що визначає якість правки і підбирається в режимі наладки правильно-відрізного автомата.

Обріз на кожному мірному прутку спостерігається у тому випадку, якщо його довжина не відповідає сумі подач, необхідних для отримання цілого числа прокатаних деталей. При цьому довжина кінцевої обрізі відповідає умові $l_{обр} < l_{дет}$.

Коефіцієнт використання металу при прокатці деталей складає 0.8-0.9, середня продуктивність 1 дет./с. За значимістю впливу складових на приведений узагальнений критерій слід виділити втрати матеріалу у вигляді відходу при прокатці кожної деталі і наявність обрізі з кожного початкового прутка, які відповідно складають 80% і 15% від сумарних втрат. Витрати часу безпосередньо на прокатку деталей у валковому інструменті складають від 50% до 90% від загальних витрат часу на отримання готових деталей.

Номенклатура освоєних на комплексах деталей досить широка. Так довжина готових деталей складає 10-150 мм при діаметрі початкового прутка 1.5-6.0 мм. При прокатці на виробі з високою точністю формуються циліндричні, сферичні і інші складні поверхні обертання, всілякі канавки та виступи. В даному процесі обробляються практично усі конструкційні сталі, ряд кольорових і жароміцних сплавів.

Проведений аналіз показав, що між продуктивністю комплексу і коефіцієнтом використання матеріалу існує взаємна залежність. В результаті, збільшення однієї з характеристик, як правило, спричиняє за собою зменшення іншої, чисельне значення якої бажано також збільшувати. Досягнення цільовою функцією максимуму не відображає усіх вимог до деталей, що виникають при прокатці, які відрізняються складністю геометричної форми і вартістю початкового матеріалу. Причина полягає в можливості збільшення цього показника за рахунок зростання однієї із складових частин при зменшенні іншої, без оцінки допустимості такого рішення. Необхідний обґрунтований компроміс між цими величинами критеріїв, оскільки кожний з них в тій чи іншій мірі є деякою цільовою функцією.

Вибір раціональної стратегії управління для конкретної деталі пропонується проводити, використовуючи ці два критерії. Як узагальнений критерій корисності вибрана відносна швидкість виходу придатного, що характеризує відносну продуктивність лінійного комплексу в одиницю часу. Узагальненим критерієм плати за корисність

прийнятні відносні втрати металу, тобто величина, зворотна коефіцієнту використання металу. Завдання вибору стратегії управління для конкретної прокатоної деталі слід формувати в одній з наступних постановок: задається потрібна корисність і вимагається досягти її при можливо менших витратах, або задаються допустимі витрати і вимагається досягти можливо більшої ефективності. Перша постановка справедлива для тих деталей, що мають складну геометричну форму, а друга – при високій вартості початкового матеріалу.

Підставою для формування пріоритетності поступок може служити економічна ефективність зміни приватних критеріїв цільової функції. Так, економічна ефективність від зниження відносної помилки подачі дорівнює:

$$E_1 = \Delta K \cdot \Delta C_1 \cdot H, \quad (6)$$

де ΔK – приріст коефіцієнта використання металу;

ΔC_1 – різниця вартості 1 кг початкового матеріалу і відходів;

H – норма витрати металу на виріб.

Аналіз статистичних даних підприємств, що впровадили комплекси ППП, показує, що вартість відходів складає в середньому 15-20% вартості початкового металопрокату [3].

Мінімізація сумарних витрат часу призводить до приросту обсягу випуску готових виробів, ефективність від цього складає:

$$E_2 = \Delta Q \cdot \Delta C_2, \quad (7)$$

де ΔQ – приріст обсягу випуску;

ΔC_2 – різниця цін 1 кг готового прокату і початкового матеріалу.

Для умов прокатки кожної деталі, що входить в номенклатуру і характеризується відповідними розмірами, виникає задача пошуку компромісного рішення, ефективність якого визначається в основному відносною помилкою подачі і часом подачі. Слід зазначити, що до механізму подачі в лінійному комплексі поперечно-профільної прокатки за умови синхронізації його роботи з частотою обертання валкового інструменту пред'являються суперечливі вимоги. Для підвищення коефіцієнта використання металу за рахунок точної подачі прутка потрібна безударна зупинка в кінцевій точці позиціонування, тобто потрібне гальмування на траєкторії руху. З іншого боку підвищення продуктивності вимагає від механізму подачі максимальної швидкодії. Крім того, прокатка деталей в мінусовому полі допусків і підвищення точності по діаметру досягається збільшенням довжини розгортки ділянки формоутворення на валковому інструменті. При обмеженні на діаметр валка це призводить до зменшення довжини завантажувальної ділянки, де не відбувається формоутворення.

Представлені задачі зводяться до двовимірних задач мінімізації з обмеженнями і відносяться до завдань нелінійного програмування. Оцінка ефективності роботи механізму подачі здійснювалася на основі методу штрафної функції [4], яка визначається мінімальним значенням виразу

$$P(x, R) = \varepsilon_0'(x) \cdot t_{под}'(x) + R[\alpha_1 \varepsilon_0'(x) - \alpha_2 \cdot t_{под}'(x)]^2,$$

де $\varepsilon_0'(x) \cdot t_{под}'(x)$ – відповідно безрозмірні масштабовані приватні критерії, що відбивають відносну помилку подачі і час подачі;

α_1, α_2 – вагові коефіцієнти, що враховують вагомість приватних критеріїв при виборі умови справедливості поступок;

R – ваговий коефіцієнт, що визначає відносну значущість обмеження та цільової функції.

Висновки. Найбільшої ефективності при рішенні цільових задач досягнуто при використанні подачі з включенням гальмування на ділянці траєкторії руху механізму подачі. Випробування вибраних стратегій управління при прокатці промислових партій деталей різної довжини показало, що для першої постановки завдання коефіцієнт використання металу складає 0.93-0.95 при середній продуктивності 1-1.2дет./с, а для другої – 0.96-0.99 при середній продуктивності 0,6 дет./с. При цьому у першому випадку використовувалося часткове гальмування, а в другому – повне гальмування з безударною зупинкою в кінцевій точці позиціонування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко В.И. Автоматизированный радиальный комплекс поперечно-клиновой прокатки / Бойко В.И., Багрий В.В., Лысенко В.Н. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – №5. – С.26-28.
2. Долгов С.Г. Оборудование для холодной поперечно-клиновой прокатки деталей электронной техники / Долгов С.Г., Украинец В.В., Вологодин А.Г. // Электронная техника. – 1986. – Сер7. – Вып. 2 (1350). – С.63-66.
3. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки / Щукин В.Я. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 223с.
4. Реклейтес Г. Оптимизация в технике / Реклейтес Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. – М.: Мир, 1986. – 352с.

Надійшла до редколегії 27.06.2014.

УДК 621.771.2-52

БАГРІЙ В.В., к. т. н., доцент
ВОЛОШИН Р.В., магістр
ЖАРОВ І.Д., магістр

Дніпродзержинський державний технічний університет

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ПРУТКА В АВТОМАТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСАХ ПОПЕРЕЧНО-ПРОФІЛЬНОЇ ПРОКАТКИ

Вступ. Процес поперечно-профільної прокатки (ППП) використовується для виготовлення деталей типу ступеневих валів та має широкі технологічні можливості. Під час прокатки можливо досягти зменшення діаметра валів в 4 і більше разів. З використанням даного процесу можуть оброблятися практично всі конструкційні сталі, ряд кольорових та жаростійких сплавів. Для умов прокатки на автоматичних комплексах ППП основним фактором, що визначає продуктивність та величину коефіцієнта використання металу, є система управління подачею прутка змінної маси в зону деформації на задану довжину для кожної деталі [1].

Особливістю процесу ППП є зміна довжини прутка в ході прокатки від максимальної початкової величини до нуля по мірі його виробки, а отже змінюється й сумарна маса, яку переміщує механізм подачі. Це призводить до необхідності врахування впливу даного фактора на параметри моделі об'єкта керування під час прокатки.

Постановка задачі. На базі аналітичних моделей технологічного процесу прокатки створити імітаційну модель, необхідну для вибору оптимальних параметрів виконавчих механізмів, розробки стратегій керування, методів та засобів взаємозв'язку підсистем управління агрегатно-модульними комплексами ППП циліндричних деталей.

Результати роботи. Сутність технологічного процесу ППП полягає в локальному впливі на заготовку валкового інструменту, робоча поверхня якого виконана у вигляді клинів з похилими гранями. Профіль розгортки клинів містить ряд характерних ділянок, які й визначають задану циклічну послідовність етапів прокатки. Кількість ділянок та геометрія профілю валкового інструменту на кожному з них в основному залежить від складності профілю готової прокатаної деталі. Проте кожний валковий інструмент має ділянку завантаження, яка характеризується зниженням радіуса нижче нульової робочої поверхні валків і тому не приймає участі в процесі формоутворення деталі, а призначена для забезпечення безперешкодного переміщення пруткової заготовки поперек валкового інструменту на необхідну довжину деталі.

Валковий інструмент безперервно обертається з частотою 0.5-1.5 об/с. За час повного циклу отримання готової деталі відбуваються послідовне суміщення всіх ділянок клинів обох валків в точці, розташованій на осі установки механізму подачі. На початку циклу механізм подачі за допомогою цангового вузла переміщає пруток поперек валкового інструменту та завантажує пруткову заготовку у міжвалковий проміжок, утворений при суміщенні ділянок завантаження. Початкова довжина прутка 2.0-2.5 м, діаметр прутка 1.0-5.0 мм. Довжина подачі дорівнює довжині готової деталі і може складати 10-150 мм. Надалі, обертаючись, валковий інструмент затискає заготовку робочою поверхнею, відрізними клинами відокремлює її від прутка і починається процес формоутворення деталі. Механізм подачі при цьому переміщує цанговий вузол назад вздовж прутка в початкову позицію і підготовлює нову порцію пруткової заготовки для наступної подачі. Формоутворення деталі закінчується при новому суміщенні ділянок завантаження, де чергова подача пруткової заготовки виштовхує готову деталь, і цикл формоутворення повторюється заново.

Час суміщення завантажувальних ділянок валкового інструменту задає обмеження на час виконання операції завантаження, що складає 0.02-0.05 с.

Крім того, експериментально встановлено, що величина помилки подачі залежить від величини кінетичної енергії, яку має пруток в кінцевій точці позиціонування при виконанні завантаження. У момент зупинки динамічне зусилля, прикладене до прутка, перевищує силу зчеплення його з цангою, і спостерігається прослизання прутка відносно цанги. Надлишок довжини подачі на кожній деталі віддаляється ножами валкового інструменту як відрізний відхід. Оцінку відносної похибки подачі $\varepsilon_{i\text{відн}}$ для кожної i -деталі з прутка можна оцінити наступним чином:

$$\varepsilon_{i\text{відн}} = \frac{\Delta l_i}{l_{\text{дет}}} = \frac{m_{i\text{нр}} \cdot v_i^2}{2 \cdot F_{\text{цп}}}, \quad (1)$$

де Δl_i – помилка подачі при прокатці i -деталі з прутка;

$l_{\text{дет}}$ – довжина готової деталі;

$m_{i\text{нр}}$ – маса прутка перед прокаткою i -деталі;

v_i – швидкість в кінцевій точці позиціонування при завантаженні прутка для прокатки i -деталі;

$F_{\text{цп}}$ – сила зчеплення цанги з прутком.

В ході прокатки маса прутка зменшується у міру його вироблення, що призводить і до зменшення величини помилки подачі.

Аналіз процесу показує, що найбільш жорсткі вимоги до швидкодії пред'являються до привода механізму подачі при виконанні операції завантаження. Крім того, так як завантажувальна ділянка не задіяна в процесі деформації та формоутворенні готової деталі при проектуванні валкового інструменту, її прагнуть зменшувати.

В якості виконавчого привода механізму подачі прутка використовується пневмоциліндр з прямолінійним рухом поршня двосторонньої дії. Цей привод повинен мати універсальність з точки зору забезпечення технології отримання деталей досить широкої номенклатури, а відповідно різної довжини готової деталі та вихідної маси прутка. Підвищення продуктивності комплексу ППП пов'язане з підвищенням швидкодії операції завантаження при прокатці кожної деталі. З іншої сторони підвищення коефіцієнта використання металу пов'язане із забезпеченням такого закону руху, який має безударну зупинку привода в кінцевій точці позиціонування, що потребує режиму гальмування при подачі прутка.

При проектуванні привода необхідно вирішити задачу динамічного синтезу, тобто для відтворення заданого закону руху робочих органів виконавчих пристроїв, заданого часу спрацювання вибрати параметри виконавчих, розподільних пристроїв, а також ліній зв'язку.

Вирішення питань автоматизації технологічного процесу в комплексах ППП наперед пов'язане з питаннями синхронізації роботи профіленакатного автомата з модулем подачі прутка та наданням більш широких можливостей для досягнення необхідних параметрів прокатки деталей. Це потребує виконувати стабілізацію окремих параметрів технологічного процесу або їх зміну в часі за заданим законом.

Зважаючи на складність задачі і її багатоваріантність, доцільно використати в даному випадку імітаційне моделювання. Імітація поведінки об'єкта надає уявлення про те, які змінні найбільш суттєві та як вони взаємодіють практично ще до створення самого об'єкта. Крім того, на імітаційній моделі можна провести експерименти, які на реальному об'єкті з ряду причин провести неможливо, та стиснути час на їх виконання.

При розробці імітаційної моделі системи подачі використано додаток Simulink інтегрованої середовища інженерних розрахунків MatLab компанії TheMathWorks [2].

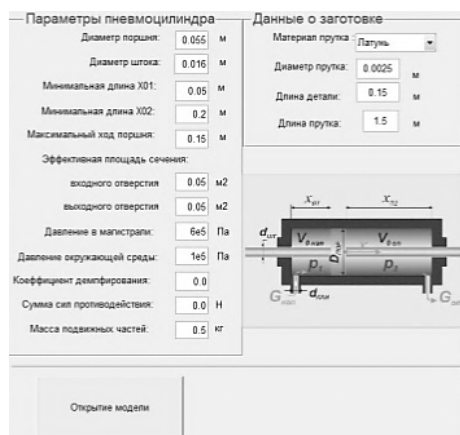


Рисунок 1 – Графічний інтерфейс користувача

Пневматичний привод складається з пневмодвигуна, повітропроводів і пневматичної апаратури різного призначення. Енергоносієм тут є стисле повітря з тиском 0,4-0,6 МПа.

Так динаміка вихідної ланки двостороннього типового пневматичного привода, зображена на рис.3, описується рівнянням

$$s_1 \cdot p_1 - s_2 \cdot p_2 = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \cdot \frac{dx}{dt} + \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2)$$

де m – маса рухомих частин поршня та прутка; x – координата переміщення поршня;

S_1, S_2 – площі торців поршня; p_1, p_2 – тиск повітря в першій та другій порожнинах;

$\sum_{i=1}^n P_i$ – сума сил, діючих на поршень;

α – величина, що враховує демпфування поршня при русі за рахунок витоків газу через ущільнення поршня. У приводах з хорошою якістю зборки і малим ресурсом напрацювання можна прийняти $\alpha = 0$.

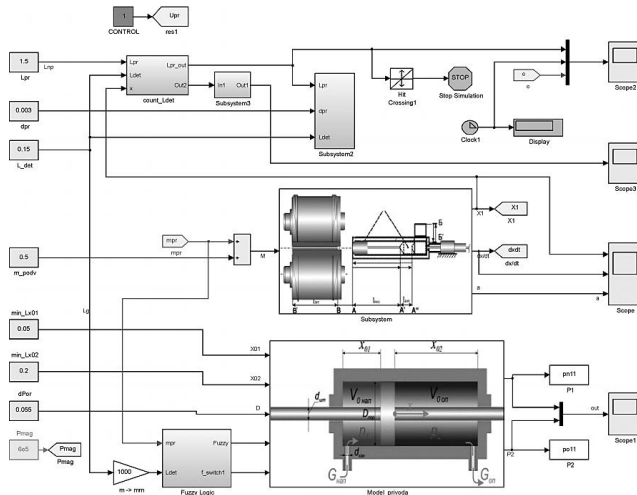


Рисунок 2 – Структурна схема імітаційної моделі системи подачі прутка

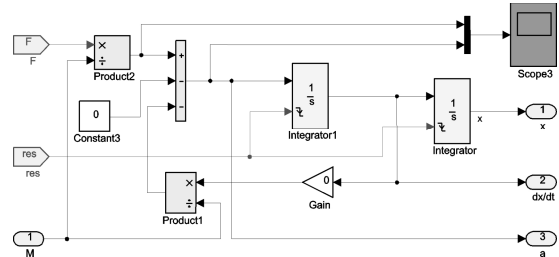


Рисунок 3 – Динаміка вихідної ланки двостороннього пневматичного привода

Площі торців поршня

$$S = \frac{\pi(D_{nop}^2 - d_{um}^2)}{4}, \quad (3)$$

де D_{nop}, d_{um} – відповідно діаметри поршня та штоку.

Наведене рівняння розраховується разом з рівняннями стану привода, що характеризуються зміною тиску в обох площях робочого циліндру (рис.4). Загальне рівняння стану привода має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{RT}{S_1} G_{nan} = \frac{dp_1}{dt} \left(\frac{V_{0nan}}{S_1} + x \right) + p_1 \frac{dx}{dt} \\ -\frac{RT}{S_2} G_{on} = \frac{dp_2}{dt} \left(\frac{V_{0on}}{S_2} - x \right) - p_2 \frac{dx}{dt} \end{cases}, \quad (4)$$

де $R = 287,14$ Дж/(кг·К) – газова стала; T – температура, К;

G_{nan}, G_{on} – витрати повітря в порожнинах наповнення та спорожнення;

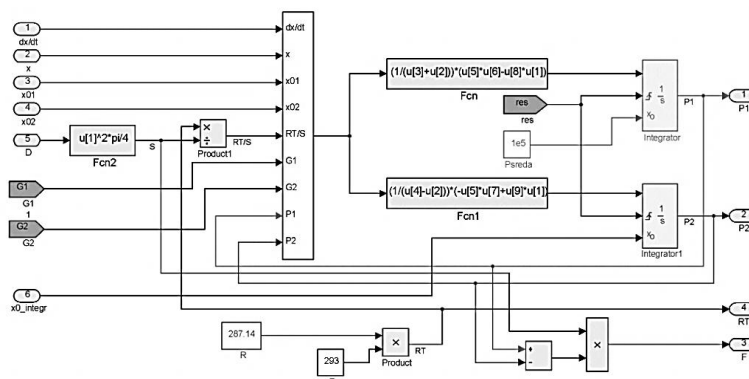


Рисунок 4 – Модель стану пневматичного привода

V_{0nan}, V_{0on} – початкові об'єми порожнин наповнення та спорожнення циліндру.

При витіканні газу з трубопроводу можуть бути два режими [3]:

- надкритичний – при цьому витрата газу не міняється зі зміною тиску довкільля;

- докритичний – при

цьому витрата газу залежить від відносного тиску.

У практичних розрахунках пневматичних пристроїв для визначення витрати через дроселі з турбулентним режимом течії використовують формули (рис.5):

- докритичне витікання ($p_{вих} / p_{ex} > 0.5$):

$$G = \mu \cdot f \cdot p_{ex} \sqrt{\frac{2}{RT} \cdot \left(\frac{p_{вих}}{p_{ex}}\right) \cdot \left(1 - \frac{p_{вих}}{p_{ex}}\right)}; \quad (5)$$

- надкритичне витікання ($p_{вих} / p_{ex} < 0.5$):

$$G = \mu \cdot f \cdot p_{ex} \sqrt{\frac{1}{2RT}}, \quad (6)$$

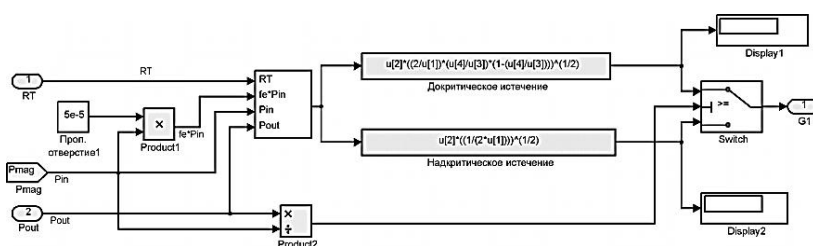


Рисунок 5 – Модель визначення витрат з турбулентним режимом протікання

де μ – коефіцієнт витрати лінії;

f – площа вхідного отвору.

Результат моделювання роботи системи управління подачею прутка дозволив вибрати оптимальні за швидкістю параметри пневматичного привода для

вказаної номенклатури деталей (рис.6).

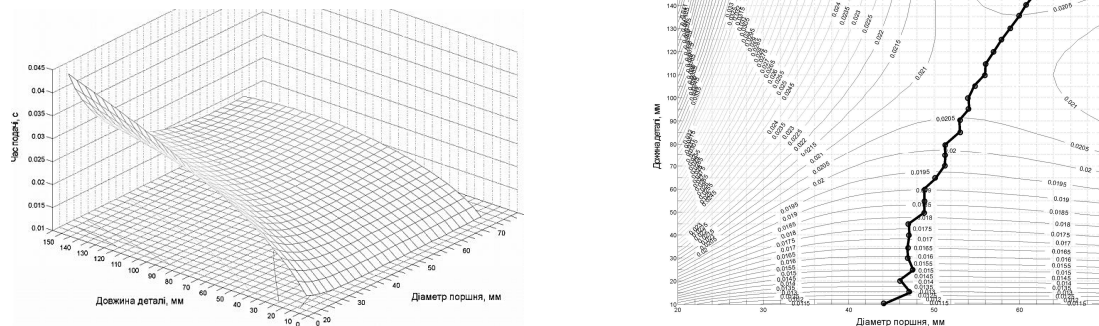


Рисунок 6 – Оцінка швидкості привода для визначеної номенклатури деталей

Наявність мінімуму в області значень витрат часу руху поршня на необхідну величину ходу та вибір параметрів привода з цих умов означає отримання заданої швидкості поршня при мінімальному перерізі повітровода і встановленої на ньому апаратури.

Відхилення від точки мінімуму в будь-яку сторону призводить зрештою до того, що час подачі прагне до нескінченності. Так зменшення площі поршня за умови, що сила опору передбачається постійною, тягне зменшення зусилля, що розвивається поршнем, і привод не в змозі здолати силу опору. Ця область параметрів відповідає області переобтяжених приводів.

Область параметрів, в якій площа поршня перевищує оптимальне значення, відповідає області малонавантажених приводів. Для неї необхідно аналізувати потребу в стислому повітрі, яке повинне заповнювати робочу порожнину. При цьому абсолютний тиск прагне до тиску довкілля і при досить великих площах поршня практично перестає змінюватися, а швидкість витікання повітря, сягнувши критичної величини, перестає

зростати.

При виборі робочих параметрів привода слід враховувати деякий запас по рушійній силі, щоб уникнути зупинки привода при збільшенні сили опору, що часто має місце в реальних умовах. Тому рекомендується вибирати площу поршня в області значень, близьких до оптимальних, але що лежать праворуч від них, тобто відповідних малонавантаженим приводам.

Моделювання дає можливість порівняти різні способи керування подачею з використанням режиму гальмування. Приклад одержаних результатів зображено на (рис.7).

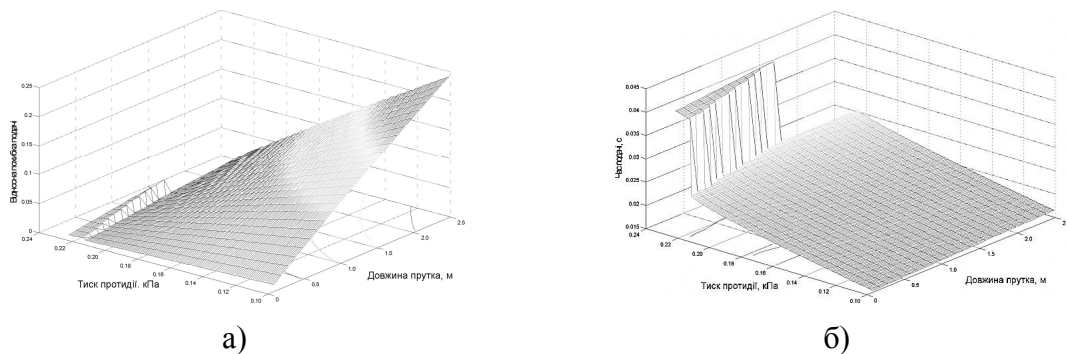


Рисунок 7 – Залежність відносної похибки подачі (а) та часу подачі (б) від змінної довжини прутка та початкового тиску гальмування ($L_{dem}=50\text{мм}$)

Режим гальмування при подачі прутка дозволяє зменшити похибку подачі заготовки на необхідну довжину для прокатки деталі, але при цьому збільшується час подачі, що впливає на продуктивність комплексу ППП. Вибір протидії при гальмуванні потребує введення обмеження, так як в іншому випадку може виникнути перевантаження привода та коливальний процес, для отримання компромісу між показниками продуктивності та коефіцієнтом використання металу, що потребує режиму гальмування.

Висновки. Імітаційне моделювання комплексу поперечно-клинової прокатки значно збільшує можливості інженерно-технічних робітників при проектуванні та виборі параметрів обладнання, дослідженні стратегій, методів та засобів керування агрегатно-модульними комплексами ППП.

Аналіз отриманих результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що зміна стратегій керування подачею впливає на вибір компромісного рішення між показниками продуктивності комплексу та підвищенням коефіцієнта використання металу. В загальному випадку прагнення до підвищення коефіцієнта призводить до зменшення відносної швидкості виходу та навпаки. Найбільша ефективність при рішенні цільових задач досягається при використанні подачі з включенням гальмування на ділянці траєкторії руху механізму подачі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко В.И. Альтернативные стратегии управления агрегатно-модульными комплексами / Бойко В.И., Багрий В.В. – К.: ИСМО, 1999. – 202с.
2. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink5/6 в математике и моделировании / Дьяконов В.П. – Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576с.
3. Герц Е.В. Пневматические приводы / Герц Е.В. – М.: «Машиностроение», 1968. – 360с.

Надійшла до редколегії 29.06.2014.

Днепродзержинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ В БАЛОЧНОМ КАЛИБРЕ

Введение. Разрезные калибры широко используются при калибровке фасонных профилей: балок, швеллеров, рельсов, тавровых и многих других сложных профилей [1]. В разрезных балочных калибрах с наклонными боковыми гранями наблюдается неравномерное обжатие по ширине в местах формирования фланцев. Эти калибры используют в первых проходах при фасонной прокатке и предназначены для придания формы раската, приближенной к готовому прокату. Разрезной калибр применяют, когда в качестве исходной заготовки используют прямоугольную заготовку. Но на современных балочных станах при прокатке двуглавых балок в качестве исходной заготовки часто используют так называемую „собачью кость” – заготовку, близкую по форме к конечному профилю, предназначенную для более равномерного обжатия в последующих проходах.

Величина неравномерности деформации определяется углом раскрытия разрезного гребня или клина. При использовании острых гребней получают значительную толщину фланцев, что затрудняет захват и последующую деформацию подката. Кроме того, вследствие интенсивного разогрева острые гребни быстро изнашиваются, что приводит к увеличению нагрузок в следующих клетях. При тупых разрезных гребнях значительно возрастают нагрузки и незаполнение фланцев.

По характеру напряженного и деформированного состояния балка условно делится на два участка: шейку и фланцы [2]. В шейке под действием нормального давления и сил трения при прокатке в балочных калибрах осуществляется всестороннее неравномерное сжатие. Фланцы валками не обжимаются и деформируются за счет растягивающих сил, возникающих в плоскости стыка с шейкой.

При проектировании разрезных калибров кроме основной задачи – получение необходимой формы и размеров полосы – решаются также задания, связанные с повышением производительности стана, уменьшением неравномерности износа валков [3].

Анализируя опыт прокатки фасонных профилей, можно заметить, что первые проблемы решались более легким и доступным экспериментальным методом. Так, примером одной из первых работ, пытавшейся объяснить суть процесса прокатки, можно назвать работу Грум-Гржимайло [4]. Здесь для анализа напряженно-деформированного состояния использовалась аналогия раскатки теста скалкой. Решение большинства проблем находили с помощью экспериментальных методов. Примером являются работы, которые основывались на экспериментах с нанесением координатных сеток на исследуемый профиль и сверление отверстий в балочной заготовке, – эти методы определяют только начальную и конечную конфигурацию сетки [5].

Однако по мере движения вперед теоретическому направлению удавалось все больше приблизиться к точному и адекватному моделированию процесса прокатки. В то время, когда теоретический метод только становился на ноги, метод промышленного эксперимента был уже на вершине своего развития, и его результаты нуждались в объяснении. На сегодняшний день теоретические исследования получили широкое распространение.

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование деформирован-

ного состояния металла на примере прокатки двутавровой балки № 18Б2 с параллельными полками, определение векторных полей течения металла в различных сечениях очага деформации.

В результате анализа литературных источников был сделан вывод, что на сегодняшний день отсутствуют исследования деформированного состояния при прокатке двутавровых балок на современных рельсобалочных станах фирмы „SMS-MEER”. Для исследования был выбран стан „SDI” фирмы „SMS-MEER”, расположенный в штате Техас в США. В состав стана входят обжимная реверсивная черновая клетка и группа клетей тандем (две универсальные и одна вспомогательная двухвалковая между ними). Была разработана калибровка валков для прокатки двутавровой балки на указанном стане. Исследование деформированного состояния проводилось для первого прохода черновой обжимной клетки, в которой анализировали сечения по очагу деформации: при захвате металла валками, посередине очага деформации, на выходе из очага деформации. Расчет проводился при помощи программного пакета ESV-Deform, разработанного на кафедре ОМД ДГТУ.

Результаты работы. В результате расчета получены поля, где стрелками указаны направление и интенсивность перемещения частиц металла (рис.1). Анализируя данные, видно, как меняется деформированное состояние металла по длине очага дефор-

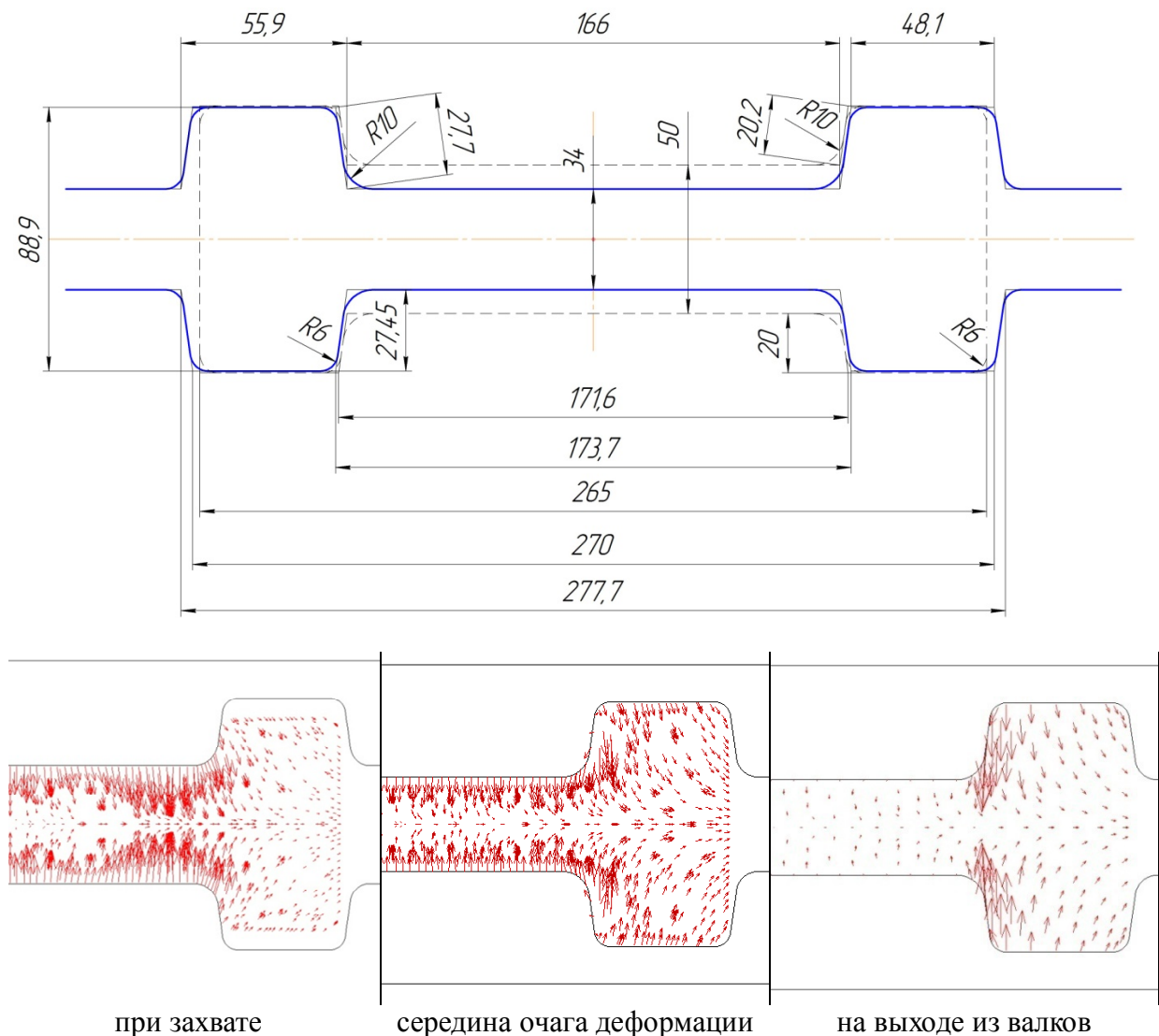


Рисунок 1 – Чертеж калибра и векторные поля скоростей

мации. При захвате заготовки валками наиболее интенсивно обжимается стенка профиля, которая первая соприкоснулась с валками клетки. Металл под действием обжатия смещается к горизонтальной оси симметрии. Лишь на фланцах металл идет на уширение. Посередине очага деформации интенсивность перемещения металла уменьшается, а на фланцах по-прежнему идет заполнение металлом. На выходе из очага деформации наибольшее перемещение частиц металла происходит в углах калибра. Всё это говорит о том, что при расчете калибровок нельзя пользоваться данными одной плоскости сечения, а необходим анализ всего очага деформации.

Зоны с растягивающими напряжениями возникают в тех случаях, когда имеется разность в скоростях течения в разных участках. Появляются тянущие участки, где действуют сжимающие напряжения, и вытягиваемые участки с растягивающими напряжениями.

Из расчета скоростей перемещения металла (рис.2) следует, что при захвате металла валками скорость течения в продольном направлении во фланцах значительно отстает от скорости по стенке профиля, что создает напряжение растяжения в углах профиля, а на раскате формируется „язык”. При переходе в среднюю часть очага деформации скорость перемещения во фланцах возрастает. На выходе металла из очага деформации скорость на фланцах снова снижается.

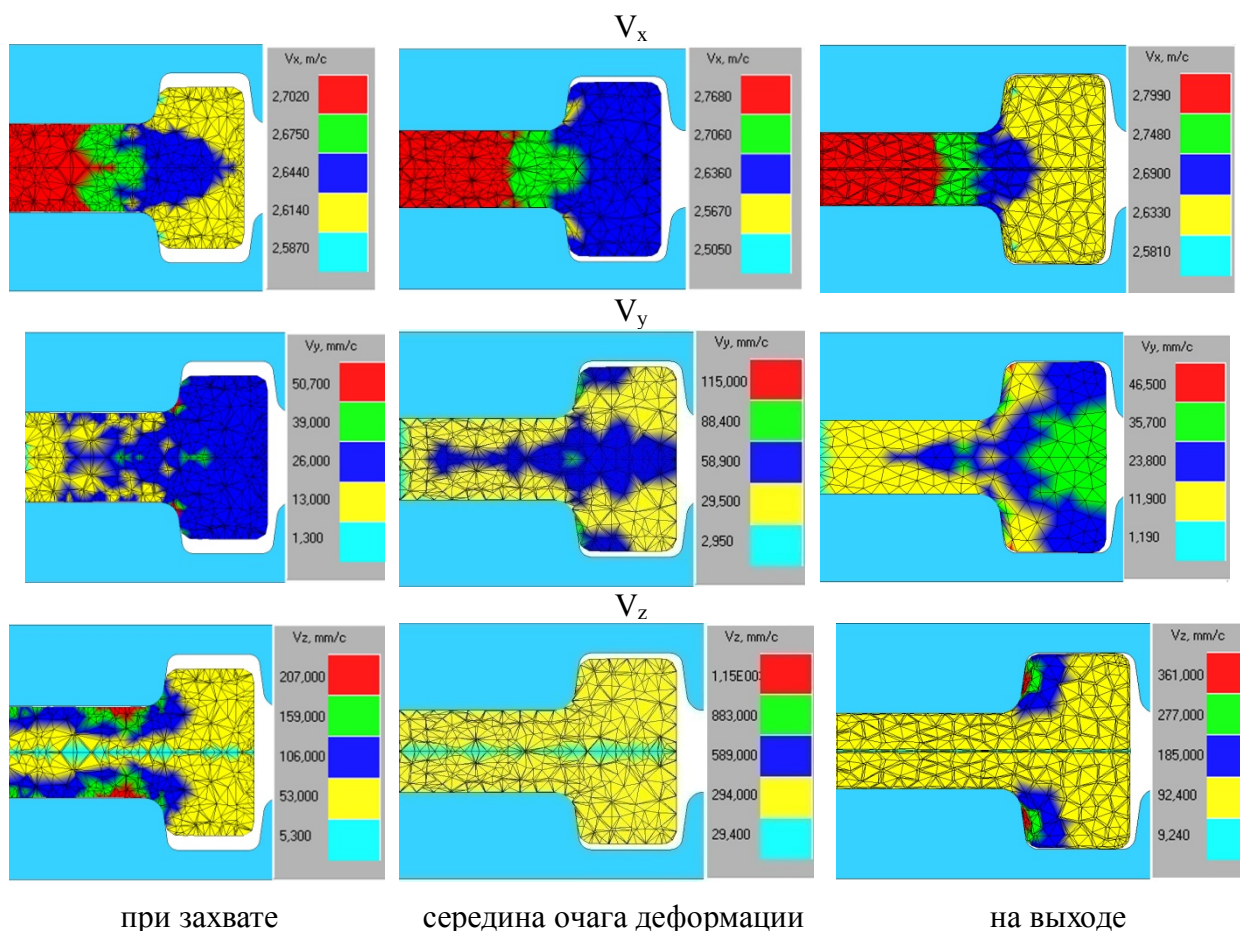


Рисунок 2 – Скорости перемещений частиц металла в различных направлениях

В поперечном направлении скорости перемещения металла при захвате меньше в центральной части стенки профиля, чем на фланцах. При переходе в среднюю часть очага деформации скорости выравниваются. Лишь по горизонтальной оси симметрии они несколько больше за счет растягивающего напряжения, поскольку основная часть

металла смещается в области боковых участков раската. При выходе металла из очага деформации поперечная скорость во фланцах продолжает расти и на их внешней стороне становится максимальной. Это приводит к тому, что металл в боковых участках резко уходит в уширение и тянет за собой металл из центральных участков полосы.

В вертикальном направлении при захвате полосы за счет обжатия валками скорость больше на поверхностных слоях стенки. В центральной части очага деформации она выравнивается и лишь на выходе увеличивается на внутренних гранях фланцев, где происходит взаимодействие внутренней части фланца с валком.

Из расчетных данных видно, что наибольшей деформации подверглась центральная часть раската, то есть стенка профиля (рис.3). Причем в начале очага деформации в поверхностных слоях стенки обжатие было значительно больше, чем по горизонтальной оси. В средней части очага деформации скорость по стенке выровнялась. В местах соединения фланцев со стенкой профиля была наибольшая деформация, а в направлении внешних граней фланцев уменьшалась. На выходе из очага деформации можно наблюдать увеличение степени деформации по стенке фланцам.

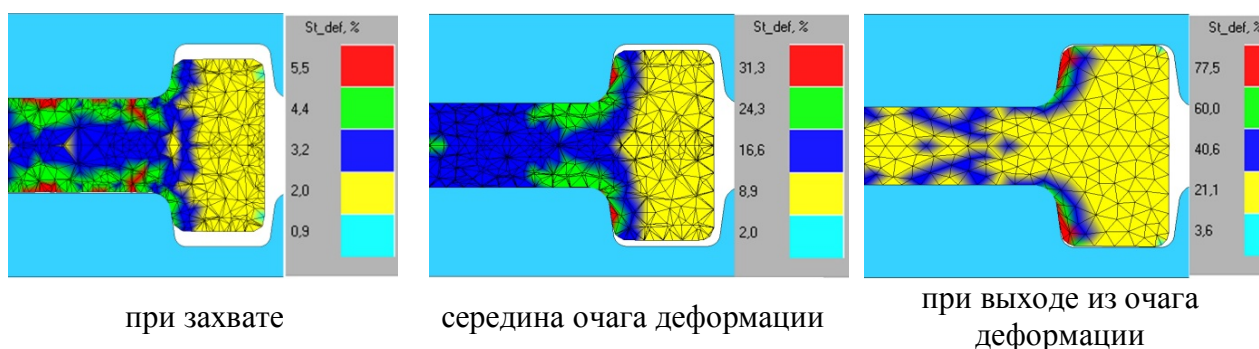


Рисунок 3 – Степень деформации

Выводы. Проведен комплексный анализ деформированного состояния металла без упрощения формы инструмента и заготовки. Применение программы ESV-Deform дает широкие возможности при исследовании процесса прокатки сложных фасонных профилей и позволяет на практике устранять недостатки калибровки валков, искать новые варианты изменения калибров и режима обжатий. В исследуемом первом проходе обжимной клетки рекомендуется дно ручья в области фланца сделать под наклоном для того, чтобы металл равномерно контактировал с дном калибра, способствуя выравниванию обжатия верхних частей фланцев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюкович Б.М. Прокатка и калибровка: справочник в 6 т. – Днепропетровск: РВА „Дніпро-ВАЛ”. – 2002. – Т. 5: Калибровка швелерообразных и корытообразных профилей / Б.М.Илюкович, Н.Е.Нехаев, В.П.Капелюшный. – 2004. – 481с.
2. Тарновский И.Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И.Я.Тарновский, А.Н.Скорородов, Б.М.Илюкович. – М.: Металлургия, 1972. – 352с.
3. Совершенствование технологии прокатки заготовок на стане 850/730/580 / И.С.Кузнецов, А.Б.Юрьев, В.Н.Беспалов [и др.] // Сталь. – 2002. – № 12. – С.40-41.
4. Грум-Гржимайло В.Е. Элементарная теория прокатки и калибровки прокатных валков / В.Е.Грум-Гржимайло. – С.-Петербург: литография Н.Трофимова, 1909. – 127с.
5. Чижиков Ю.А. Прокатываемость стали и сплавов / Ю.А.Чижиков. – Москва: Металлургия, 1961. – 451с.

Поступила в редколлегию 15.09.2014.

Дніпродзержинський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ПРОКАТЦІ РЕЙОК Р65 ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ССС

Вступ. Рейки – сталеві балки спеціального перетину, що укладаються на шпалах або інших опорах для утворення, як правило, двониткового шляху, по якому переміщується рухомий склад залізничного транспорту, міських залізниць, спеціалізований склад у шахтах, кар'єрах, кранове устаткування.

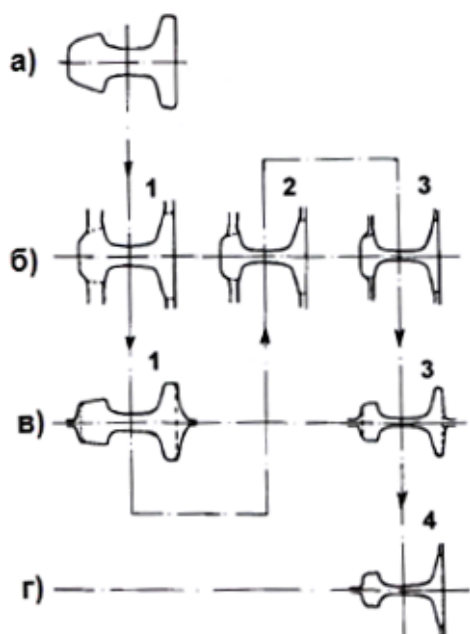
На сучасних рейкобалкових станах встановлюють триклітьові реверсивні групи безперервної прокатки з двома універсальними клітьми (групи клітей тандем). Такі агрегати працюють на фірмах Profil ARBED (Бельгія), Kangwon Ind. Ltd. (INI Steel), Pohand (Південна Корея), Steel Dynamics (США), Batou Iron and Steel (Китай), Jindal Steel and Power (Індія). Ці стани відрізняються компактним розташуванням обладнання, що скорочує масу транспортних засобів і втрати теплоти заготовки [1].

Вперше прокатування рейок на універсальній кліті було випробуване французькою фірмою Sacilor (зараз Cogus Rail) в 1964 р. Така технологія передбачає багатократне пряме обтиснення найбільш відповідальних елементів профілю – головки і підшви. Рейки, прокатані з використанням універсальних калібрів, характеризуються дрібнозернистою структурою, покращеною якістю поверхні і підвищеними механічними властивостями [2]. Однією з основних переваг такої прокатки є рівномірне формування рейки по поперечному перерізу за рахунок обтиснення горизонтальними й вертикальними валками. Форма головки рейки залишається практично незмінною протягом усього процесу прокатки, що дозволяє звести до мінімуму ризик утворення дефектів.

Також однією з важливих переваг прокатування рейок в універсальних калібрах є можливість незалежного регулювання кожного з робочих валків, що дозволяє безпосередньо в процесі прокатування коректувати проміжні розміри профілю. В чистовій кліті таке регулювання не відбувається [3].

В безперервній групі між універсальними клітьми встановлюють кліть дуо, в якій формуються розміри головки і підшви рейки по ширині. В останній універсальній кліті виконують всього один чистовий пропуск, надаючи рейці остаточних розмірів перерізу [1].

Схема прокатування в триклітьовій групі показана на рис.1. В першому проході працює чорнова універсальна (б) і двовалкова (в) кліті, в другому – тільки перша універсаль-



- а) – розкат з реверсивної кліті дуо;
- б) – чорнова універсальна кліть;
- в) – проміжна кліть дуо, що здвигається;
- г) – універсальна чистова кліть

Рисунок 1 – Схема прокатки рейок в триклітьовій групі

на кліть (б), в третьому відбувається безперервне прокатування в трьох клітях, включаючи чистову кліть (г). Валки кліті дуо (в) мають два калібри, які по чергово встановлюються на лінію прокатування поперечним переміщенням кліті [1].

За кордоном у виробництві рейок відбувся якісний стрибок, який дозволив вивести його на новий технічний рівень. А у вітчизняному рейковому виробництві з кінця 80-х років майже не відбувалась реконструкція і модернізація обладнання, що призвело до відставання рівня якісних і експлуатаційних показників рейок від продукції зарубіжних виробників і, як наслідок, втрати конкурентоздатності вітчизняних рейок на світовому ринку [4]. Лише нещодавно ця проблема в Росії почала вирішуватись за рахунок реконструкції рейкобалкового стану Західно-Сибірського металургійного комбінату та будівництва сучасного прокатного стану на Челябінському комбінаті. В Україні ця проблема до сих пір є невирішеною.

Реконструкція і технічне переоснащення виробництва рейок в Україні повинні забезпечити: виплавку рейкової сталі в кисневих конверторах або електропечах з використанням позапічної обробки сталі; прокатування рейок з безперервнолитих заготовок; нагрів заготовок в печах з крокуючими балками, що підвищить якість поверхні готових рейок; прокатування рейок з використанням універсальних клітей; загартування рейок з використанням тепла прокатного нагріву; 100%-вий неруйнуючий контроль якості металу головки, підшови і шийки рейки; автоматичний контроль розмірів профілю рейки і його прямолінійності [4].

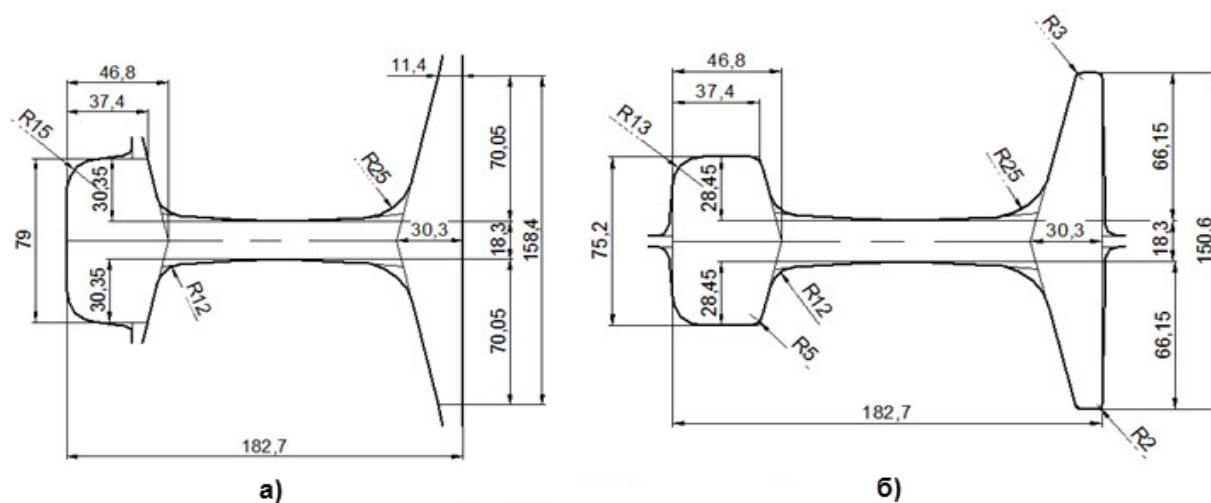
Постановка задачі. Питання формозміни металу при прокатці в рейкових калібрах має велике значення, оскільки розробка раціональних калібрувань неможлива без ретельного дослідження заповнення калібрів під час прокатування і зміни напружено-деформованого стану. Більшість з них була проведена ще в радянські часи. До них, зокрема, належать дослідження П.І.Полухіна і М.П.Галеміна [5]. Але через застарілість їх використання для сучасних схем прокатки рейок часто неможливе. В наш час можна відмітити результати експериментальних дослідів, проведених під керівництвом російських вчених В.М.Перетятко та В.П.Дорофєєва [6].

Таким чином, дослідження деформованого стану металу при прокатці у сучасних рейкових калібрах, розробка нових і вдосконалення існуючих методів розрахунку калібрувань з метою підвищення якості прокату є актуальним і потребує проведення ретельних досліджень. Оскільки проведення експериментів в умовах виробництва і в дослідних лабораторіях вимагає великих матеріальних витрат, доцільно проведення теоретичних досліджень з використанням моделювання процесів прокатки.

Результати роботи. Для схеми прокатного стану „SDI” була розрахована калібровка валків при прокатці рейки Р65 в групі клітей тандем за методикою, наведеною в [7]. Наступним кроком було виконання теоретичного розрахунку деформованого стану при прокатці в калібрах з подальшим аналізом одержаних даних. Розрахунок виконували в програмному пакеті ESV-Deform, в якому метод скінчених елементів використовується як математичний апарат для апроксимації полів швидкостей плинину металу. Методика процесу моделювання наведена в роботі [8].

Розглянемо детально дані, одержані для передчистового калібру при прокатці в допоміжній кліті дуо. Креслення розрахованого калібру разом із попереднім по ходу прокатки калібром (чорнова універсальна кліть) наведені на рис.2. Для розрахунку в програмі ESV Deform обрано наступні налаштування: для розбивання розкату на елементи використовувалася тетрадральна сітка, довжина кожної сторони трикутника становила 20 мм. В якості алгоритму рішення використано метод штрафних функцій.

Діаметри валків допоміжної кліті дуо, в якій виконується обчислюваний прохід, дорівнюють 900 мм. Швидкість прокатки – 2,6 м/с.



а) – калібр при попередній прокатці в чорновій універсальній кліті;
б) – передчистовий калібр (допоміжна кліть дуо)

Рисунок 2 – Калібри при прокатці рейки Р65 в групі клітей тандем

Результати обчислень представлені на рис.3-5.

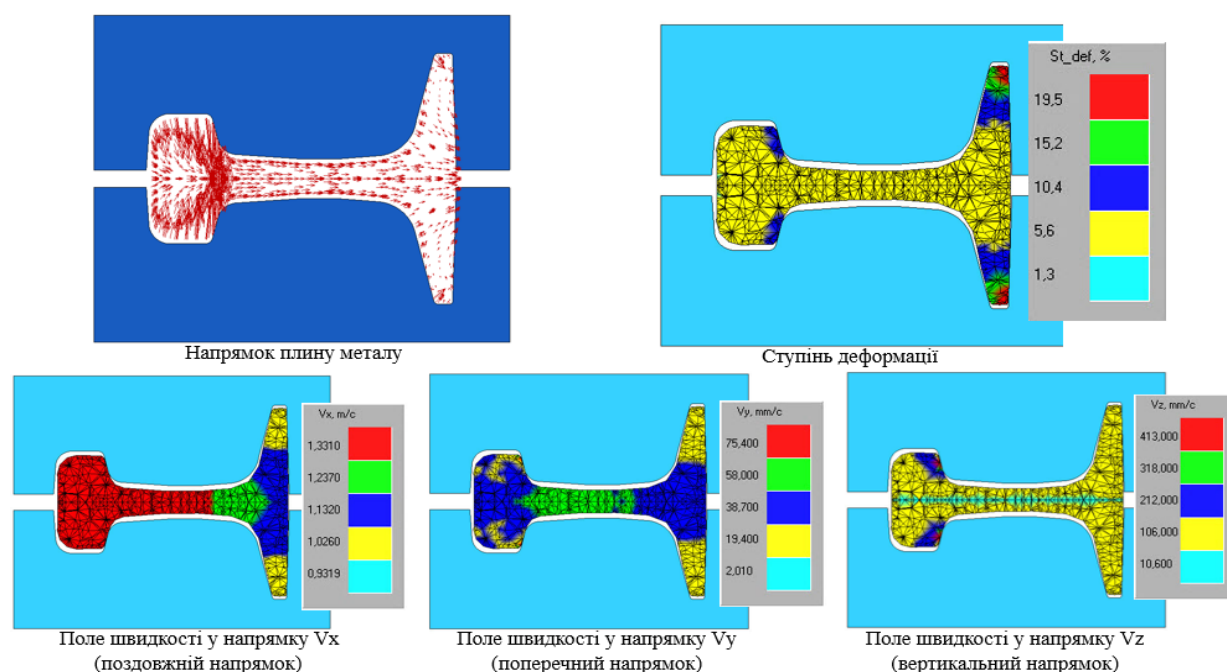


Рисунок 3 – Результати розрахунку деформованого стану в передчистовому калібрі на вході в осередок деформації

Як бачимо з рис.3, контакт металу з валками почався на підшві в місцях її контакту з бічними стінками в місцях дотику до похилої частини калібру. Контакт металу також спостерігається в місці переходу голівки у стінку профілю. Плин металу на даній

ділянці має чітко виражений напрямок в центральну, а потім у праву частину калібра. Винятком є лише невелика ділянка в місці перетину стінки з голівкою профілю, метал в якій має найбільший плин і рухається назустріч в напрямку горизонтальної осі через початок обтиснення розкату в місці переходу шийки в голівку профілю. Поле швидкості переміщення в повздовжньому напрямку нерівномірне. Голівка і ліва частина стінки мають найбільші значення швидкості, найменші спостерігаються на кінцях підшви. В поперечному напрямку найбільша швидкість переміщень в центрі стінки розкату, а також на невеликих ділянках в місцях початку контакту голівки з валками. Швидкість плину металу по висоті майже рівномірна і на більшій частині розкату не перевищує 106 мм/с. Виключенням є лише ділянки навколо нижньої частини голівки, яка вступила в контакт з похилою частиною гребеня калібра, де одержані значення швидкості доходять до 413 мм/с. Найбільша ступінь деформації спостерігається в місцях контакту металу з валками (10,4-19,5%). На ділянках, де контакт з валками ще не відбувся, значення ступеня деформації не перевищує 5,6%.

В осередку деформації (рис.4) найбільший плин металу спостерігається по стінці розкату. Від центру метал тече у різні боки. Плин металу у підшві, причому як у верхній частині, так і у нижній, а також в голівці розкату, зберігає попередній напрямок – в праву сторону калібра. Швидкість повздовжнього переміщення зберігає характер, як і у попередньому перерізі – найбільші значення мають голівка і стінка розкату (до 1,48 м/с),

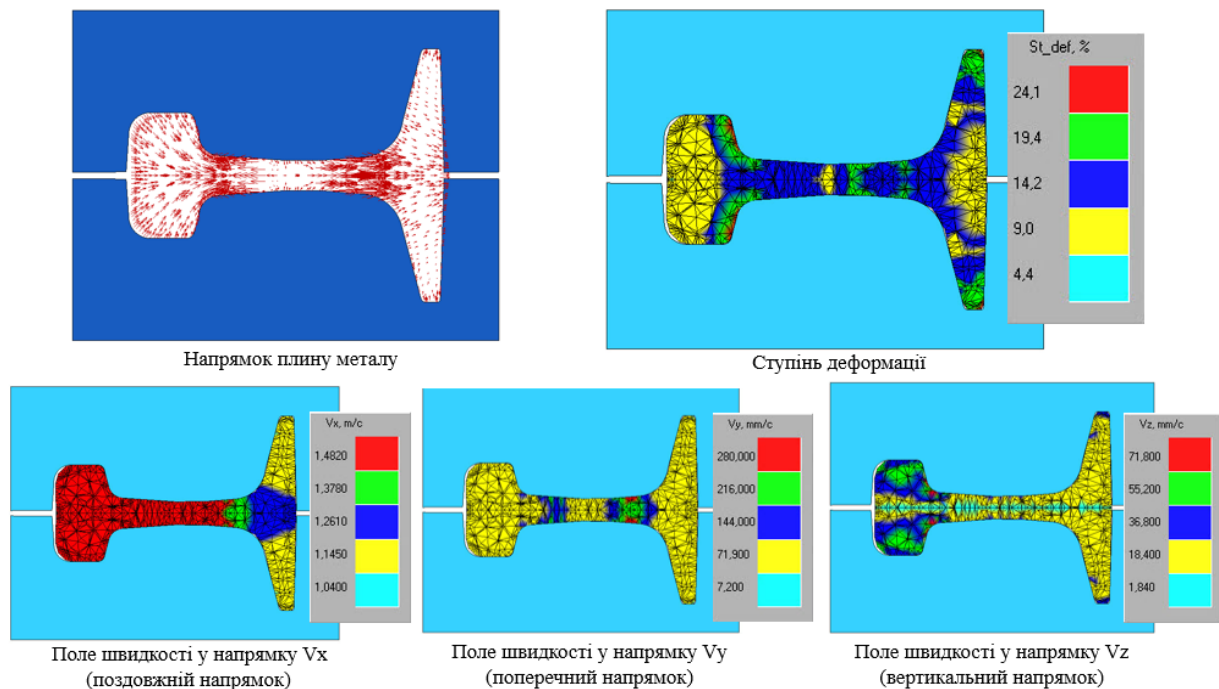


Рисунок 4 – Результати розрахунку деформованого стану в середній по довжині частині осередку деформації

значення у підшві – до 1,15 м/с. Характер плину металу в поперечному напрямку зазнав зміни. Невеликі значення швидкості маємо в голівці і у підшві, а також в середній частині стінки розкату (до 71,9 мм/с). Зона з найбільшою швидкістю поперечного плину (до 280 мм/с) розташована з правої сторони стінки в місцях контакту металу з валками. Поле швидкості плину металу по висоті також змінилося. Найменші значення (до 18,4 мм/с) бачимо в підшві розкату (окрім кінців фланців), а в голівці бачимо неоднор-

рідний плин металу зі швидкістю 18,4-71,8 мм/с, де значення 71,8 мм/с відповідає ділянці переходу стінки у голівку розкату. Обтиснення в передчистовому калібрі невелике, тож ступінь деформації по ділянках не перевищує 24,1% з внутрішньої сторони голівки і на невеликій ділянці по краях нижніх фланців. Найменший ступінь деформації одержала зовнішня сторона голівки розкату і частина підшви в області горизонтальної вісі валків (до 9%).

На рис.5 зображено поля, одержані для перерізу на виході з осередку деформування. Проаналізуємо їх. Як бачимо, плин металу остаточно набув незвичайного напрямку – тепер вже чітко видно, що плин металу всього розкату в перерізі, що розглядається, відбувається у праву сторону. А це означає велику вірогідність, що на виході з валків при прокатці розкат викривить і поверне направо, що погіршить його задачу в наступний чистовий калібр і може призвести до викривлення та інших дефектів готового профілю. Швидкості переміщень в повздовжньому напрямку майже не змінилися, а в поперечному вони стали більш рівномірними. Так, швидкості переміщень у напрямку V_y для голівки і частини підшви на горизонтальній осі, а також окремої ділянки ближче до середини стінки – до 46,8 мм/с. Найбільше значення 75,7 мм/с спостерігається у правій частині стінки, а найменше (до 31,6 мм/с) по краях підшви і у лівій частині стінки розкату. Швидкість переміщення по висоті характеризується найбільшими значеннями по верхніх краях підшви (до 12,8 мм/с), трохи менші значення маємо по нижньому краю підшви (до 9,8 мм/с), найменші значення – на горизонтальній осі калібра. Розподілення ступеня деформації схоже на те, що і на попередньому перерізу. Єдиною відмінністю є виділення зони з більшим ступенем обтиснення по внутрішній стороні підшви, а його максимальне значення – 31,2%.

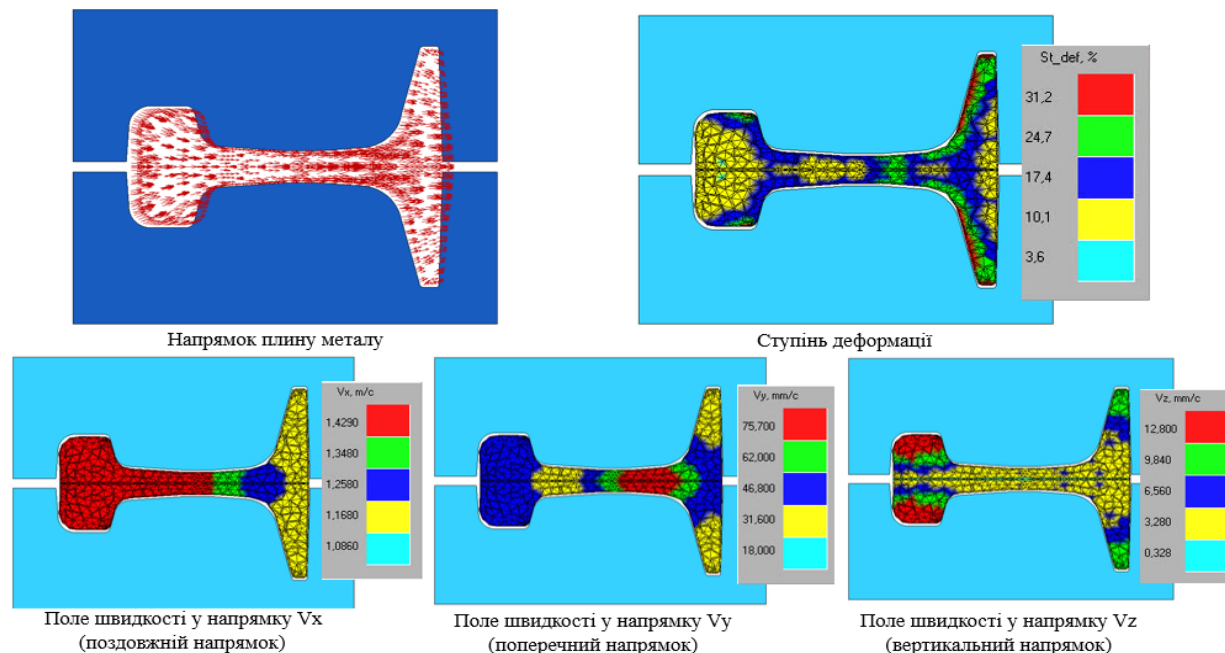


Рисунок 5 – Результати розрахунку деформованого стану на виході з осередку деформації

Висновки. За результатами проведеного дослідження можна зробити висновок про те, що деформований стан металу змінюється на протязі всієї довжини осередку

деформування, тому в аналізі напружено-деформованого стану треба враховувати весь осередок деформування разом із зовнішніми зонами.

У 12 калібрі на виході з осередку деформування плин металу відбувся в одному напрямку, що може призвести до викривлення розкату на виході з валків. Тому в цьому калібрі треба ставити направляючі лінійки в наступну універсальну чистову кліть, або корегувати методику проектування калібровки валків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Матвеев Б.Н. Современные рельсопрокатные станы / Б.Н.Матвеев // Бюллетень научно-технической и экономической информации „Черная металлургия”. – 2006. – №2. – С.40- 43.
2. Смирнов В.К. Прокатка рельсов с применением универсальных клетей / В.К.Смирнов, А.Р.Бондин, А.М.Михайленко // Пятый конгресс прокатчиков, Череповец, 21-24 окт. 2003 г.): труды. – М.: Черметинформация, 2004. – С.218-223.
3. Левченко В.Н. Развитие технологии прокатки железнодорожных рельсов и пути её совершенствования / В.Н.Левченко, Я.М.Пыхтин, В.В.Чигиринский // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. – Дніпропетровськ: Системні технології. – 2005. – Т.8. Пластична деформація металів. – С.326-329.
4. Сталинский Д.В. Пути модернизации производства железнодорожных рельсов, обеспечивающих повышение их качества / Д.В.Сталинский, А.С.Рудюк, В.Н.Левченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – №5. – С.114-116.
5. Полухин П.И. Прокатка и термическая обработка железнодорожных рельсов / П.И.Полухин, Ю.В.Грдина, Е.Я.Зарвин. – М.: Изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – 510с.
6. Дорофеев С.В. Совершенствование технологии и разработка новых способов прокатки рельсов из непрерывнолитой заготовки: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.05 „Обработка металлов давлением” / С.В.Дорофеев. – Новокузнецк, 2009. – 25с.
7. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков / В.К.Смирнов, В.А.Шилов, Ю.В.Инатович. – М.: Теплотехник, 2010. – 490с.
8. Илюкович Б.М. Теоретические основы обработки металлов давлением: в 2 т / Б.М.Илюкович, А.П.Огурцов, Н.Е.Нехаев, С.В.Ершов. – Днепропетровск: РИА „Днепро-ВАЛ”, 2002. – Т.2. – 485с.

Надійшла до редколегії 15.09.2014.