

зових переходів сірки у об'ємі шлаку; закономірності зміни структури металевих крапель у шлаку по ходу десульфурації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сігарьов Є.М. Энергоефективність інтенсифікації ківшової десульфурації чавун. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2015. №2/1(74). С.38-42.
2. Sigarev E. N., Chernyatevich A.G., Chubin K.I., Zarandiya S.A. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating. *Steel in Translation*, 2011. Vol. 41, №6. P.487-491.
3. Соломенчук А.А., Гаврилко С.А. Изучение факторов, увеличивающих потери чугуна со шлаком. *Вопросы теории и практики производства чугуна*. М., 1986. С.89-93.
4. Sigarev E.N., Chernyatevich A.G., Vergun A.S., Chubin K.I. Hydrodynamics and gas dynamics of hot-metal treatment with magnesium vapour. *Steel in translation*, 2004. Vol.38, P.1. P.9-12. <https://www.google.com.ua/url?esrc=s&q=&rct=j&sa=U&url=https://link.springer.com/journal>
5. Конопля В.Г., Плохих П.А. О механизме десульфурации чугуна при обработке его магнием. *Металлургия и коксохимия*. К.: «Техніка», 1985. Вип. 88. С.49-55.
6. Сігарьов Є.М., Недбайло М.М., Кривцун І.В. Напрямки удосконалення ковшової десульфурації чавуну. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки)*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. Вип. 2(28). С.3-9.
7. Технично-экономическое сопоставление процессов внепечной десульфурации чугуна по результатам их промышленного освоения / Шевченко А.Ф., Башмаков А.М., Маначин И.А. и др. Бюлл. «Черная металлургия». М.: Черметинформация, 2013. №10. С.9-13.
8. Теоретические основы и технологические преимущества десульфурации чугуна гранулированным магнием без кальцийсодержащих добавок / А.Ф.Шевченко, В.А.Александров, И.А.Баранник и др. *Альмамет: материалы 6-го Международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали*. Магдебург, 2000. С.23-30.
9. Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Башмаков А.М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. К.: Наукова думка, 2011. 207с.
10. Семькин С.И., Голуб Т.С., Семькина Е.В. Особенности воздействия низковольтного потенциала на металлическую фазу в шлаке, формируемом при внепечной обработке чугуна гранулированным магнием. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2015. № 6. С.2-6. - Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP\\_2015\\_6\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2015_6_3).

Надійшла до редколегії 30.10.2019.

УДК 621.771

DOI 10.31319/2519-2884.35.2019.37

МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., професор  
НИКУЛИН А.В., к.т.н., доцент  
ЛОБОЙКО Д.И., ассистент

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

### СИСТЕМНЫЙ АСПЕКТ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

**Введение.** Формы существования материи такие, как время, пространство, движение, структурированность являются частными проявлениями системности окружающего мира. Результативность современных научных исследований стала основываться на том, что в качестве их предмета рассматриваются системы, находящиеся в развитии. В результате эволюционных процессов происходит усложнение структур систем окружающего мира, которое нужно научиться исследовать и использовать [1].

Самоорганизация – это способность развивающихся систем в природе и технике к самоусложнению, созданию более упорядоченных структур в ходе эволюции и их направленности находить эффективные альтернативы объединения в системы с уменьшающейся энергоемкостью.

В частности, совершенствование процессов прокатки для обеспечения ресурсосбережения и повышения безопасности производства в современных условиях требует привлечения системного подхода. В его прикладных аспектах технологический процесс можно рассматривать как развивающуюся динамическую систему, сохраняющую устойчивость. Оценка и исследование устойчивости служит совершенствованию технологии прокатки.

**Постановка задачи.** Изменения технологических параметров процесса прокатки при его совершенствовании должны выполняться так, чтобы не изменилось состояние системы-технологии, оцениваемое как устойчивое: раскат деформируется в клетях прокатного стана в нормативном режиме, вариации величин не приводят к неконтролируемому изменению параметров.

Известно [2, 3], что из-за нарушения условий захвата раската в одной из клеток стана может начаться пробуксовка, которая и будет приводить к неконтролируемому изменению состояния динамической системы. Именно в этом направлении рекомендуется рассматривать критериальную параметризацию продольной устойчивости прокатки. Допустимы стабильные незначительные изменения усредненных показателей процесса. Качественное изменение таких показателей (переход от отрицательных к положительным значениям, скачки интенсивности изменения величин) определяет границу устойчивости и неустойчивости состояния системы.

Принято оценивать устойчивость процесса прокатки наличием зоны опережения в очаге деформации, определяемой углом нейтрального сечения  $\gamma$  [4]. При  $\gamma > 0$  имеется ресурс сил трения, способствующих захвату полосы валками. Предельным будет случай, когда  $\gamma = 0$ , и далее по формуле Эжелунда-Павлова определяется угол захвата  $\alpha = 2f$ . Однако проведенные опыты показали, что и при развитой зоне опережения возможны случаи, когда с ростом  $\alpha$  процесс обрывается из-за буксования, хотя и  $\alpha < 2f$ . В работе А.П.Чекмарева и др. [5] утверждается, что причиной потери равновесия полосы при наличии опережения являются значительные растягивающие продольные нормальные напряжения, которые возникают при прокатке с углами захвата, большими, чем коэффициент трения.

Необходимые для анализа эпюры контактных напряжений можно получить при решении дифференциального уравнения Т.Кармана с использованием корректной для условий задачи модели трения. Зная эпюры контактных напряжений и используя условие пластичности, нетрудно рассчитать продольные внутренние напряжения  $\sigma_x$ , текущие продольные силы  $Q_{x\text{ пр}}^*$  и их среднеинтегральное результирующее значение  $Q_{\text{ср пр}}^*$ .

Цель работы – обосновать использование результирующей продольных сил  $Q_{\text{ср пр}}^*$  в качестве критерия продольной устойчивости, т.е. сохранения системности технологии прокатки при выполнении мероприятий по ее совершенствованию, например, ресурсосбережению.

**Результаты работы.** Термин «устойчивость» весьма многозначен в научно-технической литературе, будучи в употреблении и при исследовании классической устойчивости по Ляпунову, и при анализе организационной жесткости. Для всех возможных трактовок этого термина общим моментом является интуитивное понимание того, что слово «устойчивый» обозначает, что нечто (иными словами, система) способно реагировать на изменения в окружающей среде (например, возмущения, случайные помехи) и по-прежнему сохранять приблизительно то же самое поведение на протяжении

конечного или, возможно, бесконечного промежутка времени. Совершенно ясно, что при столь нечетком и туманном «определении» попытки математического анализа устойчивости заведомо затруднительны. Тем не менее, такое «определение» создает некоторую интуитивную основу для более точных умозаключений.

Для большей ясности изложения удобно ввести две категории понятия устойчивости. Первую из них назовем «классической», она используется для анализа в задачах исследования результатов внешних воздействий на фиксированные системы, когда изменяется только окружающая среда, но не сама система. В качестве простого примера подобной ситуации можно привести классический маятник.

В отличие от классического равновесного подхода центральным элементом современных взглядов на вопросы устойчивости является понятие «структурной устойчивости». Здесь основной задачей является выявление качественных изменений в траектории движения/развития при изменениях структуры самой системы. Фактически изучается поведение данной системы по отношению к поведению всех «близких» к ней аналогичных систем.

Если рассматриваемая система ведет себя «почти так же», как и «соседние», то говорят, что она «структурно устойчива», в противном случае – «структурно неустойчива». Для уточнения этого понятия необходимо четко определить, что такое «близкая» система, каков класс допустимых возмущений и что значит «схожесть поведения». Тем не менее, основная идея остается прозрачной, достаточно малые изменения структурно устойчивой системы должны приводить к соответственно малым изменениям ее поведения.

Положение устойчивых равновесных состояний и соответствующих областей притяжения зависит от динамики изучаемой системы, поэтому важно знать, как они изменяются при небольшом изменении самой системы. Вопрос относительно того, приведет ли такое изменение к смещению данного состояния системы в другую область притяжения, представляет большой практический интерес, поскольку это привело бы к резким качественным изменениям в дальнейшем поведении системы. В качестве одного из инструментов исследования таких вопросов может рассматриваться теория катастроф.

Обычно в теории катастроф предполагается, что поведением изучаемого процесса управляет некоторая потенциальная функция, локальные минимумы которой соответствуют равновесным состояниям. Очень важно иметь в виду, что при таком подходе не обязательно точно знать, что это за функция – достаточно признать лишь сам факт ее существования. Для механических систем – это функция энергий или мощностей. Предположим далее, что можно измерять значения некоторых выходных переменных, генерируемых системой в ответ на входные воздействия. В «элементарной» теории катастроф предполагается, что все равновесные выходы фиксированы, т.е. фиксируют значения входных параметров и ждут перехода в равновесное состояние. Затем изменяют значения входных параметров и снова ждут установления равновесия. По результатам испытаний (натурных или вычислительных) получают поверхность равновесных состояний в пространстве выходов, которую можно изобразить как многозначную функцию входов. В первом приближении можно сказать, что «катастрофа» происходит тогда, когда возникает скачкообразное изменение выходных параметров при непрерывном изменении входов.

Для того, чтобы проиллюстрировать эти рассуждения о важности анализа областей притяжения, принимаем, что переход от одной области притяжения к области притяжения другого устойчивого состояния можно изобразить, как это показано на рис. 1.

Точка  $X$  вначале принадлежит области притяжения состояния  $P$ , которая расположена «ближе». Вследствие изменений динамики системы область притяжения  $P$  сужается с I до II, а область притяжения  $Q$  расширяется с 1 до 2. Теперь точка  $X$  притягивается к  $Q$ , а не к  $P$ .

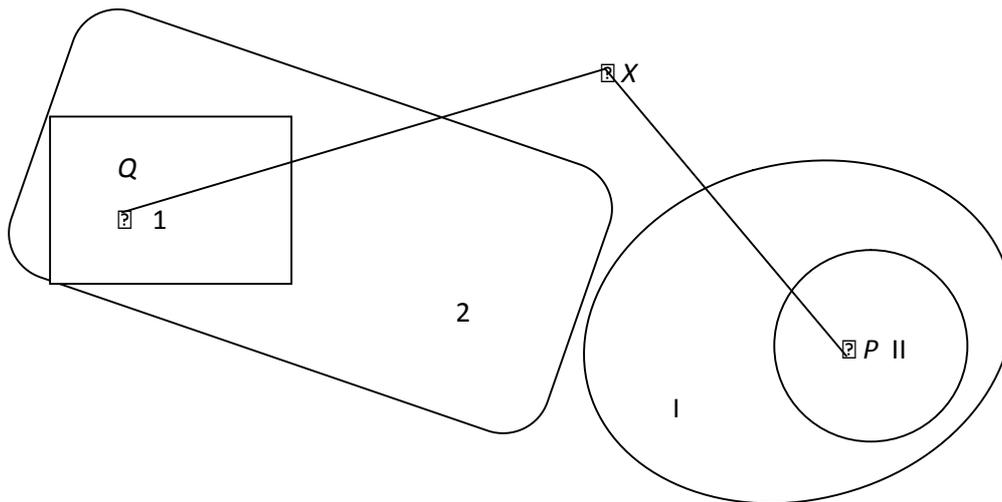


Рисунок 1 – Смещение областей притяжения

Конечно, положения  $P$  и  $Q$  сами зависят от структуры системы, поэтому объекты, изображенные точками, по существу являются областями, содержащими  $P$  и  $Q$ , но важно лишь то, что области  $P$  и  $Q$  отделены друг от друга, следовательно, возмущения в структуре системы, приводящие к изображенной выше ситуации, порождают разрывы непрерывности в выходах, если наблюдаемые выходы оказываются равновесными состояниями.

Далее кратко коснемся понятия «адаптивности». Признано, что одним из наиболее желательных свойств системы является ее способность воспринимать внешние воздействия (ожидаемые или неожиданные) без необратимых фатальных изменений в ее поведении. Иными словами, адаптируемость в некотором смысле является мерой жизнеспособности или выживаемости системы. Естественно, для формулировки этого понятия в математических терминах необходимо точно определить, какие воздействия считаются «допустимыми» и что следует понимать под «выживаемостью». Тем не менее, даже такое интуитивное описание адаптируемости показывает, что это понятие тесно связано с понятием области притяжения и со смещением этих областей под действием естественных или искусственных возмущений. Если эти возмущения перемещают данное состояние системы в область притяжения «фатального состояния», то ясно, что система не обладает свойством адаптируемости по отношению к данному классу возмущений. В противном случае она в той или иной степени обладает адаптивностью.

Переходим к конкретике системного аспекта продольной устойчивости прокатки. В основе метода, позволяющего оценить предельную захватывающую способность валков в установившемся режиме [6], лежит рассмотрение продольных нормальных напряжений и сил, возникающих в пластически деформируемом металле. Исходными данными для их определения являются эпюры контактных нормальных напряжений, которые можно получить при решении дифференциального уравнения Т.Кармана с использованием корректной для данных условий модели трения. Зная распределение давления в зоне контакта и используя уравнение пластичности, нетрудно рассчитать продольные внутренние напряжения, текущие продольные силы и их среднеинтегральное результирующее значение. При устойчивой прокатке эта результирующая не может быть направлена по ходу прокатки (быть положительной), т.к. она является силой сопротивления, реактивной силой. Из этого следует, что предельные условия прокатки наступают тогда, когда сила  $Q_{ср пр}^*$  равна нулю. Если эта сила является сжимающей (отрицательной), процесс совершается устойчиво, и полоса в очаге деформации находится в равновесном состоянии.

При этом, как уже упоминалось, потеря равновесия полосы может возникать и при наличии зоны опережения. Это возможно потому, что при дальнейшем увеличении угла захвата втягивающих металл в валки сил становится недостаточно, чтобы одновременно погасить прирост выталкивающих сил и уравновесить результирующую  $Q_{cp}^*$ .

Анализ этой результирующей позволяет дать оценку продольной устойчивости полосы в очаге деформации и установить, будут ли соблюдаться условия, при которых прокатка ведётся без пробуксовки. Таким образом, продольную устойчивость полосы в очаге деформации, т.е. прокатку без пробуксовок, можно оценить по значению среднеинтегральной результирующей силы пластически деформируемого металла.

Предложенный метод оценки продольной устойчивости процесса стал основой способа прокатки, на который получен патент [7].

Последовательность оценки продольной устойчивости процесса прокатки состоит в следующем:

– в результате численного решения уравнения Т.Кармана получаем эпюры контактных напряжений в безразмерном виде  $\frac{P_x}{2k_{cp}}$  и  $\frac{t_x}{2k_{cp}}$ ;

– из эпюры нормального давления, используя уравнение пластичности, определяем продольное внутреннее напряжение  $\frac{\sigma_x}{2k_{cp}}$ :

$$\frac{\sigma_x}{2k_{cp}} = \frac{P_{cp}}{2k_{cp}} - 1;$$

– рассчитываем значение текущей продольной внутренней силы пластически деформируемого металла:

$$Q_{xnp}^* = \frac{\sigma_x}{2k_{cp}} \left( \frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right);$$

– определяем среднеинтегральную результирующую силу:

$$Q_{cp\ np}^* = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_{xnp}^* d\varphi.$$

Методика оценки продольной устойчивости полосы в очаге деформации основана на определении среднеинтегральной результирующей внутренней силы. Как уже указывалось, в зависимости от её величины и направления прокатка может совершаться устойчиво без частичных пробуксовок, вестись в предельных условиях или же быть невозможной.

При теоретических исследованиях продольной устойчивости с помощью опытных эпюр контактных напряжений целесообразно использовать текущую горизонтальную контактную силу

$$Q_{xk}^* = \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{q_x}{2k_{cp}} d\varphi,$$

где  $q_x$  – результирующие горизонтальные контактные напряжения;

$$\frac{q_x}{2k_{cp}} = -\frac{P_x}{2k_{cp}} \sin \varphi + \frac{t_x}{2k_{cp}} \cos \varphi,$$

и её среднее значение

$$Q_{\text{ср к}}^* = \frac{1}{\alpha_y} \int_{\varphi}^{\alpha_y} Q_{\text{хк}}^* d\varphi.$$

Как следует из равенства  $Q_{\text{ср пр}}^* = 2 \cdot Q_{\text{ср к}}^*$ , по величине этой силы можно дать оценку продольной устойчивости полосы в очаге деформации.

Если сила  $Q_{\text{ср к}}^*$  положительна, то процесс протекает устойчиво, в случае  $Q_{\text{ср к}}^* = 0$  прокатка протекает в предельных условиях. При  $Q_{\text{ср к}}^* < 0$ , т.е. при её отрицательном значении, процесс невозможен.

Заметим, что поскольку опытные эпюры в литературе приводятся в размерной форме, то и расчёт удобно вести также в размерной форме.

Перевод текущей контактной силы из безразмерной формы в размерную осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{хк}} = 2k_{\text{ср}} R \cdot b \cdot Q_{\text{хк}}^*,$$

где  $Q_{\text{хк}}$  – текущая контактная сила в размерной форме;

$Q_{\text{хк}}^*$  – текущая контактная сила в безразмерной форме.

Проанализируем изменение средней результирующей контактных сил  $Q_{\text{ср к}}$  в зависимости от условий прокатки по опытным эпюрам контактных напряжений. Для этого воспользуемся экспериментальными данными, которые приведены в работах [5, 6]. Эпюры нормального давления и удельных сил трения подобраны с учётом изменения кинематики процесса, обеспечивающей прокатку с опережением металла и при одностороннем скольжении его в очаге деформации. Условия прокатки, при которых измерялись контактные напряжения, приведены в табл. 1, ширина образцов  $b = 50$  мм.

Таблица 1 – Параметры прокатки при исследовании контактных напряжений

| № опытов | Толщина образцов, мм |       | Средний коэф. трения | Диаметр валков, мм | Угол захвата, рад | Параметр формы $\frac{l_d}{h_{\text{ср}}}$ | Источник | Условия прокатки                          |
|----------|----------------------|-------|----------------------|--------------------|-------------------|--|----------|---|
|          | $h_0$                | $h_1$ |                      |                    |                   |  |          |   |
| 1        | 6                    | 4,2   | 0,207                | 210                | 0,131             | 2,7  | [5]      | Горячая прокатка стали                    |
| 2        | 2                    | 1     | 0,123                | 208                | 0,098             | 7  | [8]      | Прокатка свинца с технологической смазкой |
| 3        | 2,2                  | 1,2   | 0,048                | 208                | 0,098             | 6  | [8]      | Прокатка свинца с технологической смазкой |

На рис.2 представлены эпюры распределения давления  $p_x$  и удельных сил трения  $t_x$  при горячей прокатке стальных образцов с параметром формы  $\frac{l_d}{h_{\text{ср}}} = 2,7$ , взятые из [5].

Из кривой распределения удельных сил трения  $t_x$  следует, что зона опережения в очаге деформации значительна, она обеспечивает устойчивость процесса прокатки в продольном направлении.

Ниже представлено изменение продольных напряжений  $q_x$  и текущей горизонтальной силы  $Q_{\text{хк}}$ , рассчитанных по вышеприведенным формулам.

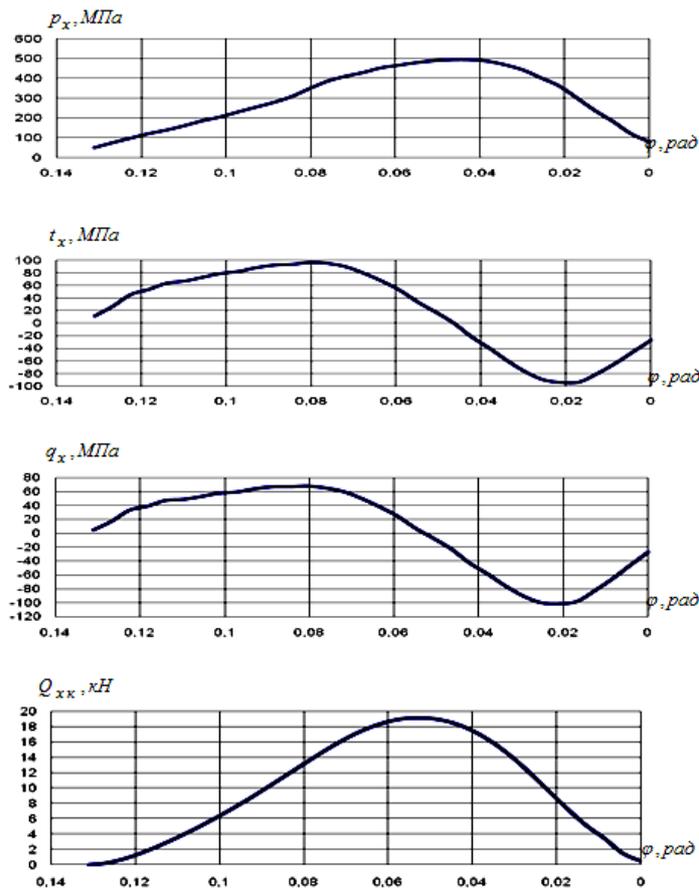


Рисунок 2 – Эпюры напряжений и сил в очаге деформации при прокатке стальных образцов

трения слабее развиты, зона опережения является меньшей, что отразилось на распределении текущей результирующей силы. Как видно, в начальной части очага деформации она принимает отрицательное значение, в средней части и ближе к выходу металла из валков эта сила изменила свой знак. Среднее значение силы  $Q_{xk}$  равно 0,085 кН. Следовательно, и в этом случае процесс является устойчивым (теоретически и экспериментально).

Графики, приведенные на рис.3 (пунктирная линия), характеризуют прокатку с однозонным скольжением металла в очаге деформации. Автор [8] отмечает, что в этом случае эпюры контактных напряжений получены при неустойчивой прокатке с пробуксовками металла. Поэтому на эпюре давления наблюдаются периодические колебания и провалы.

Анализируя кривую напряжений  $q_x$ , можно заметить, что её изменение противоположно ранее рассмотренным случаям. Эпюра распределения силы  $Q_{xk}$  по всей длине очага деформации принимает отрицательное значение, а средняя результирующая  $Q_{срk}$  тормозит движение полосы и равна – 0,101 кН).

По опытным эпюрам контактных напряжений средняя результирующая горизонтальных сил в зависимости от параметров прокатки может принимать разные значения и характеризовать переход к предельным условиям деформации.

**Выводы.** Представленные результаты исследования показывают, что предложенные критерии оценки устойчивости процесса прокатки с использованием средней ре-

Как видно из графика распределения  $Q_{xk}$ , текущая сила во всех сечениях зоны контакта полосы с валками положительная, на границах очага деформации она равна нулю. Из этого следует, что рассматривается установившийся процесс прокатки. Среднее значение силы  $Q_{xk}$  является положительным и равным 10,19 кН.

В соответствии с используемыми критериями следует, что при таком значении горизонтальной силы процесс прокатки будет протекать устойчиво без частичных пробуксовок. Это соответствует результатам проведения опытов.

На графиках (рис.3, сплошная линия) показаны эпюры распределения контактных, горизонтальных результирующих напряжений и сил для условий второго опыта (табл.1).

По сравнению с предыдущим случаем удельные силы

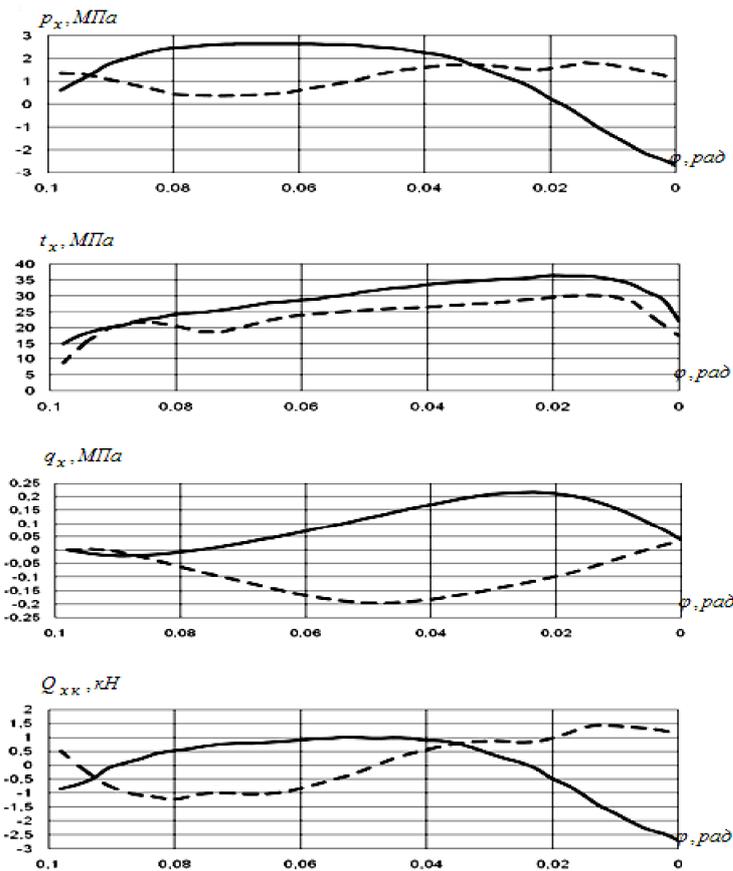


Рисунок 3 – Эпюры напряжений и сил в очаге деформации при прокатке свинцовых образцов

гия. Приложения: монография. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Наукова думка, 2011. 727с.

- Грудев А.П. Теория прокатки. 2-е перераб. и доп. изд. М.: СП Интермет Инжиниринг, 2001. 280с.
- Максименко О.П., Лобойко Д.И., Измайлова М.К. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография. Днепропетровск: ДГТУ, 2016. 213с.
- Василев Я.Д., Минаев А.А. Теория продольной прокатки: учебник для магистров вузов. Донецк: УНИТЕХ, 2010. 456с.
- Экспериментальное исследование максимальных углов захвата при установившемся процессе прокатки / А.П.Чекмарев, В.И.Прокофьев, В.П.Галицкий и др. *Обработка металлов давлением: науч. труды ДМетИ*. М.: Металлургия, 1967. Вып. LI. С.79-88.
- Максименко О.П., Романюк Р.Я. Методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки. *Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"*. Харьков: НТУ "ХПИ". 2009. № 33. С.84-90.
- Спосіб прокатування плоских виробів: пат. 89747 Україна: В21В1/22. О.П.Максименко, В.М.Самохвал, М.Є.Нехаєв, Д.І.Лобойко. № 201314742; заявл. 16.12.13; опубл.25.04.14, Бюл. № 8.
- Клименко П.Л. Контактные напряжения при прокатке с технологической смазкой. Сучасні проблеми металургії: наукові вісті. Т.8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології». 2005. С.44-49.

Поступила в редколлегию 09.10.2019.

зультуючої внутрішніх або контактних сил адекватні. Вони більш точно характеризують граничні умови порівняно з геометричним по суті умовою  $y = 0$ . Згідно розрахунків порушення рівноваги сил в очаг деформації з наступною пробуксовкою металу можуть виникати і при наявності зони опереження. Результати опытных прокаток різних дослідників підтверджує цей системний висновок.

Приведені основи утверждать, що продольна стійкість прокатки характеризує системні властивості технології – її структурну стійкість і адаптивність.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системный анализ. Проблемы. Методология. Приложения: монография. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Наукова думка, 2011. 727с.
- Грудев А.П. Теория прокатки. 2-е перераб. и доп. изд. М.: СП Интермет Инжиниринг, 2001. 280с.
- Максименко О.П., Лобойко Д.И., Измайлова М.К. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография. Днепропетровск: ДГТУ, 2016. 213с.
- Василев Я.Д., Минаев А.А. Теория продольной прокатки: учебник для магистров вузов. Донецк: УНИТЕХ, 2010. 456с.
- Экспериментальное исследование максимальных углов захвата при установившемся процессе прокатки / А.П.Чекмарев, В.И.Прокофьев, В.П.Галицкий и др. *Обработка металлов давлением: науч. труды ДМетИ*. М.: Металлургия, 1967. Вып. LI. С.79-88.
- Максименко О.П., Романюк Р.Я. Методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки. *Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"*. Харьков: НТУ "ХПИ". 2009. № 33. С.84-90.
- Спосіб прокатування плоских виробів: пат. 89747 Україна: В21В1/22. О.П.Максименко, В.М.Самохвал, М.Є.Нехаєв, Д.І.Лобойко. № 201314742; заявл. 16.12.13; опубл.25.04.14, Бюл. № 8.
- Клименко П.Л. Контактные напряжения при прокатке с технологической смазкой. Сучасні проблеми металургії: наукові вісті. Т.8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології». 2005. С.44-49.