

УДК 621.771.01

Сатонин А. В.
Бобух В. И.
Картавенко А. С.
Жуков П. Л.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ТОЛСТЫХ ЛИСТОВ И ПОЛОС

Дальнейшее совершенствование технологий и оборудования листопрокатного производства неразрывно связано с развитием соответствующих методов их расчета, осуществляемых на основе как инженерных, так и численных подходов. Среди инженерных методов расчета энергосиловых параметров процесса горячей прокатки относительно толстых листов и полос, характеризующихся соотношением длины дуги контакта L и средней толщины h_{cp} в диапазоне $L/h_{cp} < 2,5$ следует указать на результаты работ [1–4]. В то же время наличие современных численных подходов, включающих в себя метод конечных элементов, реализуемого, например, в рамках оболочки ABAQUS / CAE [5], свидетельствует о целесообразности количественной оценке известных методик и их дальнейшего развития на основе учета большего количества факторов.

Целью работы является количественная оценка уточнения и расширения сферы использования методов расчета энергосиловых параметров процессов прокатки относительно толстых листов и полос.

Основными энергосиловыми параметрами при горячей прокатке относительно толстых листов и полос являются сила P и суммарный момент M прокатки, определяемые с точки зрения инженерных подходов как [1]:

$$P = 2K_c L B n_\sigma; \quad M = P \psi L, \quad (1)$$

где $2K_c$ – среднеинтегральное по длине очага деформации удвоенное значение сопротивления сдвигу деформируемого металла, определяемое при горячей прокатке на основе методик Л. В. Андreyюка или М. Я. Бровмана [3, 6, 7];

B, L – ширина прокатываемых полос, а также общая протяженность очага деформации, определяемая в зависимости от режимов обжатий и радиусов рабочих валков [1];

n_σ – коэффициент напряженного состояния, характеризующий количественно подпирющее воздействие внешних зон и сил внешнего контактного трения;

ψ – коэффициент плеча, являющийся относительной геометрической координатой точки приложения равнодействующей силы прокатки [1].

Непосредственное определение коэффициента напряженного состояния в зависимости от соотношения протяженности очага деформации L и средней толщины полосы h_{cp} осуществляют на основе различных инженерных методов расчета, среди которых наибольшее распространение получили:

– методика Целикова-Смирнова [1], основанная на экспериментальном подходе:

$$n_\sigma = (L/h_{cp})^{-0.4}; \quad (2)$$

– методика М. Я. Бровмана [3], основанная на использовании метода верхней оценки в виде построения и последующего анализа кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости и плоскости годографа скоростей:

$$n_\sigma = 0,5(L/h_{cp} + h_{cp}/L); \quad (3)$$

– методика В. Ф. Потапкина [2], основанная на использовании метода полей линий скольжения, позволяющего в полной мере учесть двухмерный характер пластического формоизменения металла:

$$n_{\sigma 1} = 1 + 1,5 \left(1 - L/h_{cp}\right)^3 \text{ при } L/h_{cp} < 1; \quad (4)$$

$$n_{\sigma 2} = 1 + 0,2(L/h_{cp} - 1) \text{ при } 1 \leq L/h_{cp} < 2,5.$$

Результаты численной реализации методик (2)–(4), а также аналогичные результаты, полученные на основе метода конечных элементов с использованием пакета ABAQUS / CAE [5], представлены на рис. 1, а их анализ свидетельствует о достаточной степени количественного и качественного соответствия различных методов расчета. При этом наиболее близкой к результатам конечно-элементного моделирования является методика В. Ф. Потапкина [2] в то время, как методика М. Я. Бровмана [3] предоставляет несколько завышенные на 5...10 (%) результаты расчета коэффициента напряженного состояния металла в очаге деформации процесса прокатки относительно толстых листов и полос.

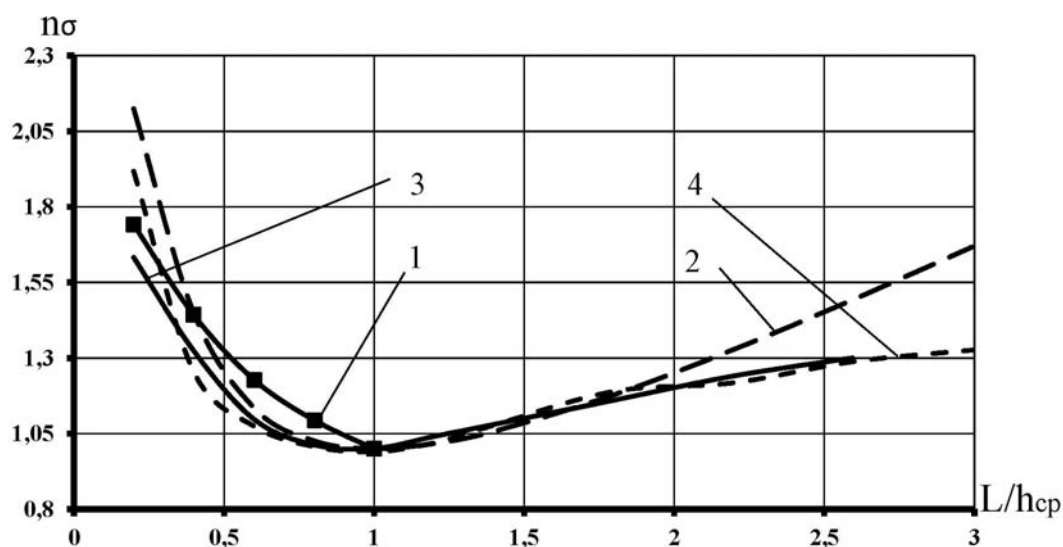


Рис. 1. Расчетные распределения коэффициентов напряженного состояния n_{σ} в зависимости от соотношения L/h_{cp} , полученные на основе различных методик:

1 – методика Целикова-Смирнова (2); 2 – методика М. Я. Бровмана (3); 3 – методика В. Ф. Потапкина (4); 4 – значения, полученные с использованием метода конечных элементов

Аналогичный анализ был проведен и по отношению к количественным оценкам коэффициента плеча ψ , при этом в качестве сопоставляемой была использована методика В. Ф. Потапкина [2] в виде:

$$\psi = 0,6 - 0,3(0,5 - L/h_{cp})^2 \text{ при } 0,2 \leq L/h_{cp} \leq 0,7; \quad (5)$$

$$\psi = 0,6 - 0,15\sqrt{L/h_{cp} - 0,7} \text{ при } 0,7 < L/h_{cp} < 2,5.$$

Графическая интерпретация результатов данного сопоставления представлена на рис. 2, а их анализ свидетельствует об удобоваримом качественном соответствии, количественно же степень несоответствия рассмотренных методик не превысила 20 %.

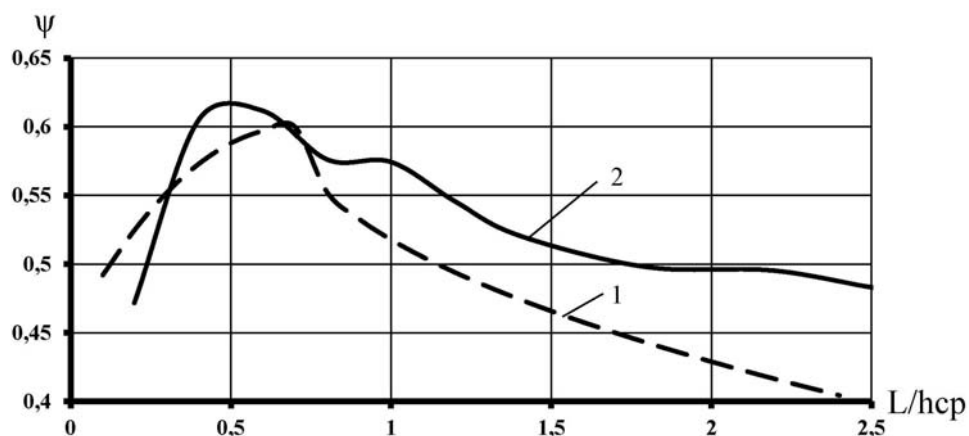
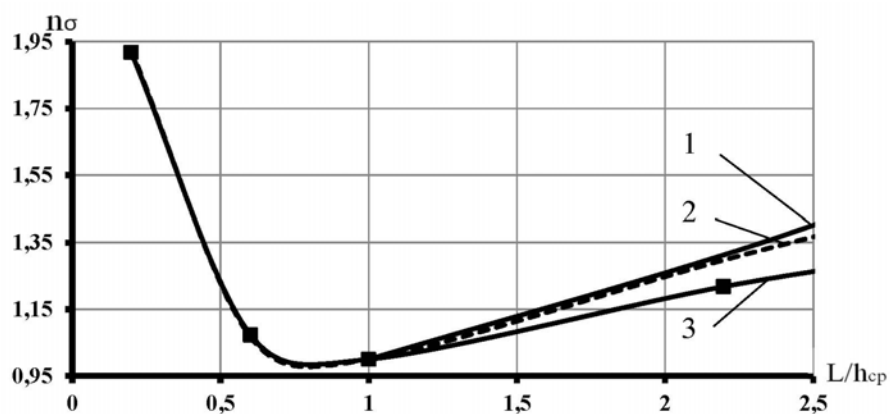
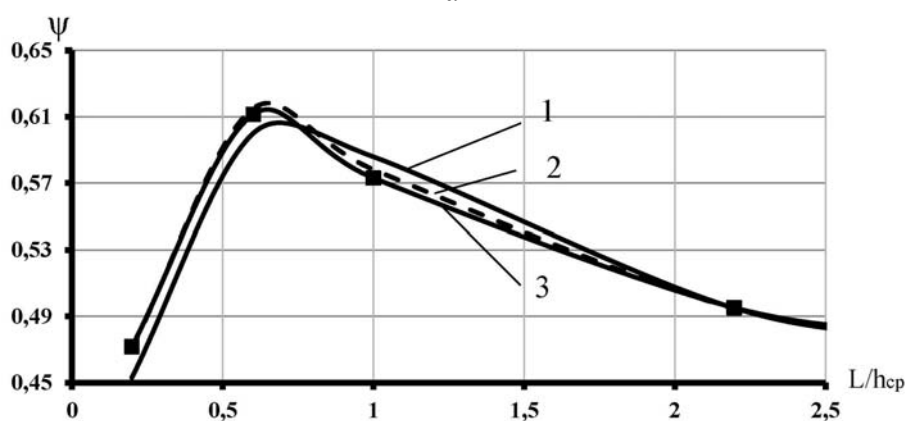


Рис. 2. Расчетные распределения коэффициента плеча ψ в зависимости от значения L/h_{cp} , полученные на основе следующих методик:

1 – методика В. Ф. Потапкина (5); 2 – расчетные распределения, полученные на основе метода конечных элементов



а



б

Рис. 3. Расчетные распределения коэффициента напряженного состояния n_{σ} (а) и коэффициента плеча ψ (б) в зависимости от соотношения L/h_{cp} , полученные при различных значениях коэффициента трения $\mu = 0,45$ – (1), $\mu = 0,35$ – (2), $\mu = 0,25$ – (3)

Достаточная степень соответствия известным и широко используемым методам расчета позволила реализовать конечно-элементный подход применительно к анализу влияния не только чисто геометрического соотношения L/h_{cp} , а и коэффициента внешнего контактного

трения μ . Полученные в этом случае результаты представлены на рис. 3, а их анализ свидетельствует о достаточно существенном влиянии данного параметра на коэффициент напряженного состояния металла n_σ в диапазоне $L/h_{cp} > 1$.

Аналитически результаты конечно-элементного математического моделирования (см. рис. 3, а) могут быть представлены зависимостью вида:

$$n_\sigma = 1 + 0,65\mu(L/h_{cp} - 1) \text{ при } L/h_{cp} > 1. \quad (6)$$

Влияние сил внешнего трения на коэффициент плеча ψ , определяющего момент прокатки, является не столь существенным (см. рис. 3, б) и при практическом использовании может не учитываться.

ВЫВОДЫ

На основе сопоставления результатов численной реализации известных и достаточно широко апробированных методов расчета энергосиловых параметров при прокатке относительно толстых листов и полос подтверждена возможность применения конечно-элементного математического моделирования данной технологической схемы с использованием пакета ABAQUS / CAE. Уточнена зависимость по определению коэффициента напряженного состояния металла, учитывающая влияние не только геометрического соотношения общей протяженности очага деформации и средней толщины проката в диапазоне, $L/h_{cp} > 1$, а и влияние коэффициента внешнего контактного трения, при этом уточнение составляет 5–10 %. Также следует отметить, что метод конечных элементов можно применять как для расчета локальных, так и для расчета интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
2. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос : монография / В. Ф. Потапкин. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 316 с.
3. Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке / М. Я. Бровман. – М. : Металлургия, 1991. – 265 с.
4. Развитие численных математических моделей процесса горячей прокатки относительно тонких листов и полос / А. В. Сатонин, С. С. Настоящая, А. С. Картавенко, П. Л. Жуков // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1 (22). – С. 84–87.
5. SIMULIA Abaqus/CAE User`s Manual v 6.7 2008.
6. Андreyuk Л. В. Определение давлений металла на валки при горячей прокатке сталей и сплавов широкого сортамента / Л. В. Андreyuk // Теория прокатки : материалы всесоюз. научн.-техн. конф. «Теоретические проблемы прокатного производства». – М. : Металлургия, 1975. – С. 383–385.
7. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 243 с.

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

Бобух В. И. – нач. отдела ЗАО «НКМЗ»;

Картавенко А. С. – аспирант ДГМА;

Жуков П. Л. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ЗАО «НКМЗ» – ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua