

УДК 621.967.3:519.872

Боровик П. В.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ КРИВОЙ ТЕКУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА И КРИВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ПРОЦЕССА РЕЗКИ НА НОЖНИЦАХ**

Стремительный рост возможностей вычислительной техники способствует успешному развитию подходов теоретических исследований, базирующихся на разработке численных математических моделей, в основу которых положены методы теории упругости и пластичности, а также вопросы механики разрушения. В настоящее время математическое моделирование процессов обработки давлением применяется для анализа и оптимизации исследуемых процессов и имеет большое значение для теории и практики.

В современных условиях, применение процесса горячей резки в технологических линиях производства толстых горячекатаных листов является весьма эффективным и перспективным [1]. Поэтому, расширение представления о протекании процесса горячей резки является важной научно-практической задачей, для решения которой целесообразно использовать современные теоретические подходы и методы, среди которых особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ) [2, 3].

Для достижения максимальной степени адекватности результатов моделирования МКЭ экспериментальным данным, необходимо соблюдение целого ряда условий и требований. Применительно к процессу резки металла на ножницах для получения адекватных результатов моделирования также существует ряд требований, которые должны учитывать особенности реализации и протекания процесса [4].

Основной проблемой при исследовании процесса горячей резки следует, прежде всего, указать диапазон рабочих температур, который составляет 400 ... 800 °С [1], поскольку он недостаточно исследован на предмет механических свойств разрезаемых сталей [5]. В дополнение к сказанному можно добавить, что для получения данных о поведении материала, в процессе деформирования, как правило, используют испытания на растяжение, что значительно ограничивает диапазон экспериментальных результатов, поскольку предельные деформации при испытании на растяжение металла в холодном состоянии, составляют 0,2...0,4, а при горячей деформации могут достигать 1,0 и зависят от температуры испытаний. В тоже время по данным работы [6] истинные деформации в локальных объемах заготовок перед разрушением могут достигать 10...20.

В работе [7] была сделана попытка использования экспериментальных данных процесса резки параллельными ножами с целью учета пластических свойств материала разрезаемого в горячем состоянии. Однако при использовании результатов данного исследования для других температурных условий не были получены удовлетворительные результаты, что указывает, прежде всего, на решение частной задачи.

Основной причиной такого результата, следует считать недостаточную изученность процесса резки.

Целью данной работы является расширение представления о протекании процесса резки горячего металла на ножницах и установление взаимосвязи между кривой текучести материала и кривыми сопротивления срезку на базе математического моделирования методом конечных элементов.

Для достижения указанной цели проводились теоретические исследования на базе программного комплекса Abaqus. Для чего была разработана конечно-элементная математическая модель, описывающая плоскую задачу резки параллельными ножами и учитывающая жесткость станины [8].

Исходными данными для расчета были приняты следующие: толщина разрезаемого листа – 10 мм, ширина отрезаемой кромки – 15 мм, номинальная температура процесса – 600, 700 и 800 °С, скорость резки – 28 мм/с.

В качестве исследуемого материала была выбрана сталь 09Г2, поскольку для этой марки стали в литературе [9] приведены данные о ее пластичности в области близкой к исследуемому диапазону температур. Кривую текучести  $\bar{\sigma} = f(\bar{\varepsilon})$ , характеризующую механические свойства для выбранной марки стали, определяли по химическому составу в соответствии с известной методикой Л. В. Андreyока [10].

Учитывая, что на базе данной модели решается плоская задача, то жесткость станины ножниц участвующая в расчетах определялась как величина, приведенная к единице ширины разрезаемой заготовки  $C = 2000 \frac{\text{Н/мм}}{\text{мм}}$ .

По результатам моделирования были получены зависимости изменения во времени силы резки, приходящейся на 1 мм ширины (рис. 1, а) и величины внедрения ножей в металл (рис. 1, б) при различных температурах.

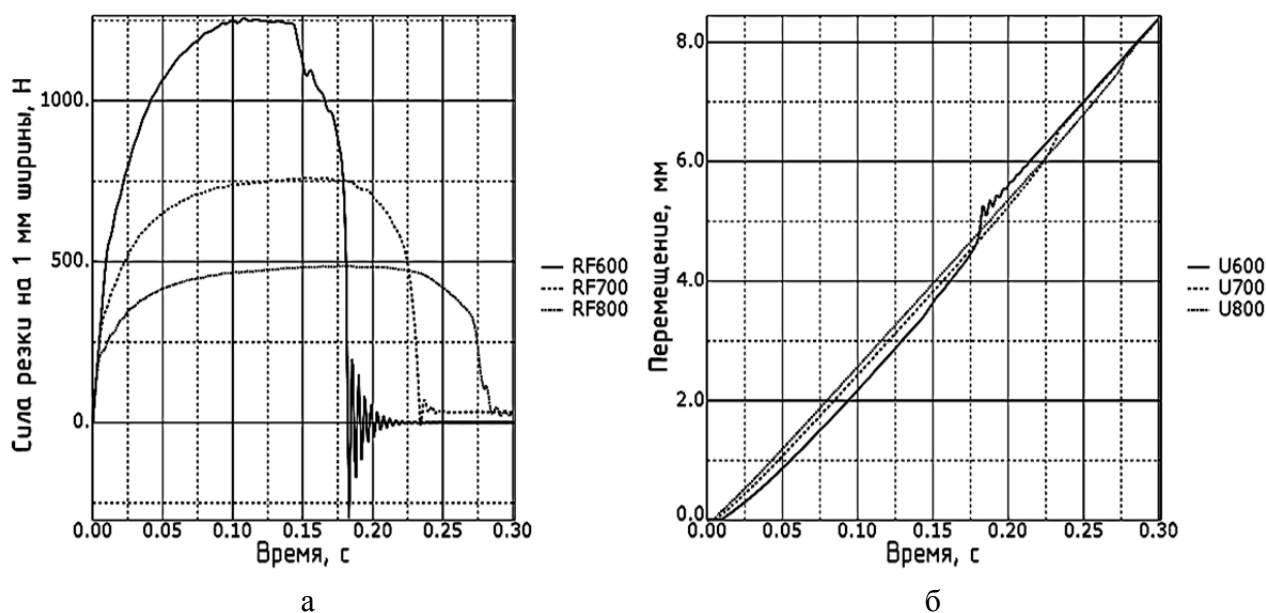


Рис. 1. Зависимости изменения во времени силы резки, приходящейся на 1 мм ширины (а), и величины внедрения ножей в металл (б) по результатам моделирования при различных температурах

Анализ зависимостей силы резки показывает, что на первоначальном этапе внедрения наблюдается одинаковый характер нарастания силы. В то же время, на графиках зависимостей внедрения ножей в металл наблюдается внедрение очень близкое к нулю. Такое поведение можно объяснить упругой деформацией станины до момента начала роста пластических деформаций в металле.

При дальнейшем анализе процесса резки устанавливалась связь между относительной глубиной внедрения ножей в металл  $\varepsilon$  (отношение величины внедрения к разрезаемой толщине) и величиной пластической деформации (рис. 2).

Поскольку величина пластической деформации в ходе процесса резки представляет собой интегральный показатель, то вначале были определены элементы, которые претерпевают разрушение и величины пластической деформации для соответствующих им элементарных объемов, а затем были получены усредненные значения. Так на рис. 2, а представлены зависимости накопления пластической деформации (усредненные значения для всех разрушаемых элементов) в разрезаемом сечении от относительной глубины внедрения.

При обработке полученных результатов были определены значения относительного внедрения ножей до скола и соответствующая пластическая деформация при полном разрушении разрезаемого сечения для различных температур (табл. 1).

Таблица 1

Показатели, соответствующие разрушению разрезаемого сечения

Температура, °С	Относительное внедрение до скола $\varepsilon_H$	Степень пластической деформации при разрушении $\bar{\varepsilon}_{\max}$
600	0,481	2,97
700	0,658	4,42
800	0,793	5,43

При этом была установлена функциональная связь между степенью пластической деформации при разрушении  $\bar{\varepsilon}_{\max}$  и относительным внедрением до скола  $\varepsilon_H$  :

$$\bar{\varepsilon}_{\max} = 7,84 (\varepsilon_H - 0,1). \quad (1)$$

В ходе анализа полученные зависимости пластической деформации в разрезаемом сечении от относительной глубины внедрения (рис. 2, а) были преобразованы к относительным (единичным) координатам (рис. 2, б).

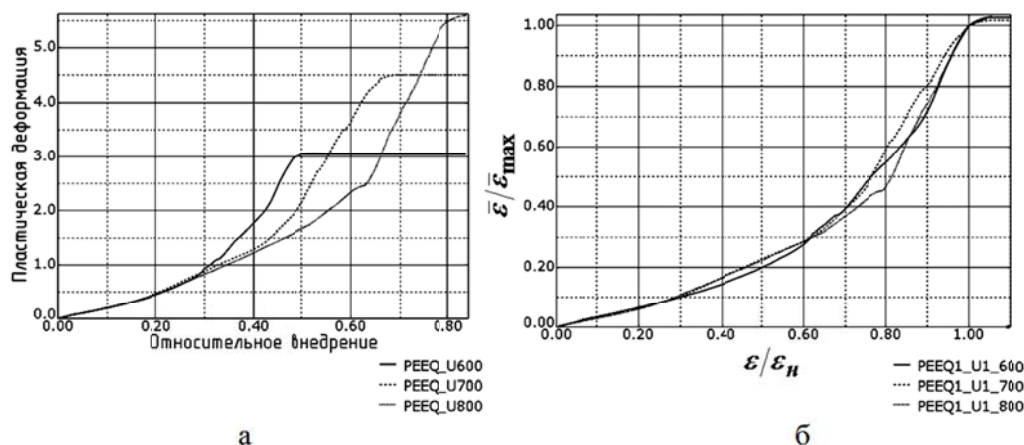


Рис. 2. Зависимости накопления пластической деформации от относительной глубины внедрения:

а – усредненные для всех разрушаемых элементов; б – преобразованные к относительным (единичным) координатам

Как следует из рис. 2, б, в относительных координатах, независимо от температуры все три зависимости имеют практически идентичный вид (отличия можно объяснить погрешностями при определении усредненных значений пластической деформации). Данный факт указывает на функциональную связь между пластической деформацией и относительной глубиной внедрения, которая описывается зависимостью:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{e^{\left(2\sqrt{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H}\right)} - 1}{e^{2\sqrt{2}} - 1} \bar{\varepsilon}_{\max}. \quad (2)$$

На следующем шаге, по аналогии с работой [9], на основании результатов моделирования были получены зависимости изменения истинного сопротивления срезу  $\tau_{\varepsilon}$ , характеризующего отношение силы резки к остаточной площади разрезаемого сечения, в зависимости от глубины относительного внедрения ножей  $\varepsilon$ . Затем, используя выражение (2), истинное сопротивление срезу было представлено в функции пластической деформации  $\tau_{\varepsilon} = f(\bar{\varepsilon})$  и получены соотношения  $\tau_{\varepsilon}/\bar{\sigma}$ , которые для различных температур представлены на рис. 3.

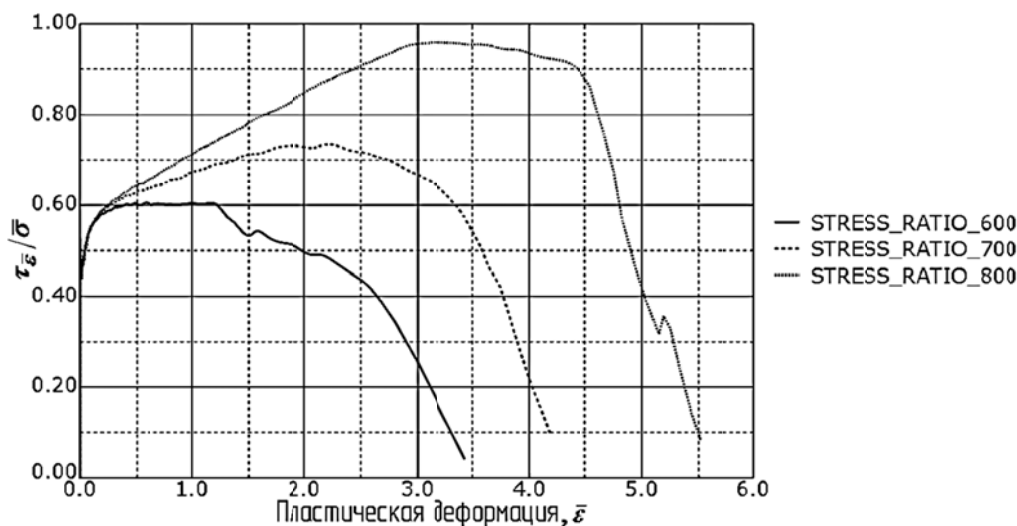


Рис. 3. Соотношение между кривыми сопротивления срезу и кривыми текучести по результатам моделирования для разных температур

Математическая обработка зависимостей представленных на рис. 3, позволила установить следующую функциональную связь:

$$\frac{\tau_{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} = \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} + \bar{\epsilon} \frac{\bar{\epsilon}_{\max} \epsilon_H}{32} \right] \cdot \left[ \left( 1 - e^{-16\bar{\epsilon}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) + \frac{1}{\sqrt{2}} \right]. \quad (3)$$

Таким образом, на заключительном этапе исследования были получены кривые текучести материала с использованием выражений (1)–(3), которые сравнивались с известными зависимостями, примененными при моделировании процесса резки (рис. 4).

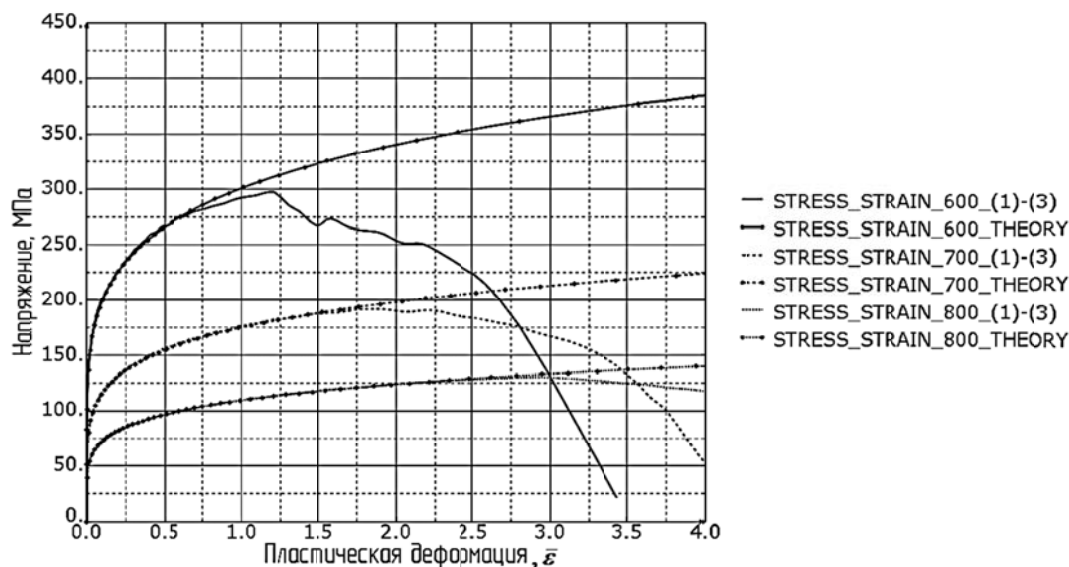


Рис. 4. Сравнение зависимостей напряжение-деформация, используемых при моделировании (•) и полученных по его результатам на базе кривых силы резки на ножницах с помощью выражений (1)–(3) при различных температурах

Как можно видеть из представленных зависимостей исходные кривые напряжение-деформация имеют достаточно высокую сходимость с кривыми, полученными на базе уравнений (1)–(3). Наличие такой взаимосвязи позволит расширить представление о процессе резки и получать кривые напряжение-деформация на базе экспериментальных кривых силы резки на ножницах.

Наличие расхождения между кривыми при росте интенсивности деформаций можно объяснить тем, что по мере роста деформации в материале заготовки постепенно накапливаются повреждения, которые в определенной степени влияют на поведение материала.

Таким образом, необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования в данном направлении, что позволит расширить представление о поведении материала и собственно процесса резки.

## ВЫВОДЫ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

– между кривыми текучести материала и кривыми истинного сопротивления срезу, полученными из зависимости силы резки при реализации процесса на ножницах с параллельными ножами, существует функциональная связь;

– разработанный алгоритм получения кривых текучести материала на базе кривых истинного сопротивления срезу показывает достаточно высокую степень сходимости независимо от температуры разрезаемой заготовки;

– расхождения между кривыми при росте интенсивности деформаций можно объяснить тем, что по мере роста деформации в материале заготовки постепенно накапливаются повреждения, которые оказывают влияние на поведение материала;

– необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования с целью расширения представления о поведении материала и собственно процессе резки.

Результаты работы могут быть использованы при исследованиях и развитии методов расчета процесса резки на ножницах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровик П. В. *Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах* : дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, спец. 05.03.05 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225 с.
2. Liu G. R. *The Finite Element Method : A Practical Course* / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 с.
3. Боровик П. В. *Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением* : монография / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – 299 с.
4. Боровик П. В. *Развитие методов численного моделирования процессов резки металла на дисковых ножницах* / П. В. Боровик // *Сборник научных трудов ДГМА*. – Алчевск, 2006. – Вып. 22. – С. 166–172.
5. Полухин П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов* / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : *Металлургия*, 1976. – 488 с.
6. Wisselink H. H. *Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph. D-Thesis* / H. H. Wisselink. – Twente, The Netherlands, 2000.
7. Боровик П. В. *Решение проблемы учета механических свойств материала при моделировании процесса горячей резки на ножницах* / П. В. Боровик, В. А. Луценко // *Сборник научных трудов*. – Алчевск : ДонГТУ, 2010. – Вып. 32. – С. 175–181.
8. Боровик П. В. *Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины* / П. В. Боровик // *Вестник национального технического университета «ХПИ»* : сб. науч. тр. – Харьков, 2011. – Вып. 47. – С. 76–80.
9. Паришин В. А. *Деформируемость и качество* / В. А. Паришин, Е. Г. Зудов, В. Л. Колмогоров. – М. : *Металлургия*, 1979. – 192 с.
10. Коновалов Ю. В. *Расчет параметров листовой прокатки* : справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : *Металлургия*, 1986. – 430 с.

Боровик П. В. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: borovikpv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2012 г.