

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.771.01

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ КОКРОФТА–ЛЭТЭМА (COCROFT–LATHAM)

Е. А. Суздальцев, В. В. Яшин

В данной работе был проанализирован процесс горячей прокатки плит из сплава АМг5 в реверсивной клети Самарского металлургического завода (СМЗ) при помощи метода конечных элементов (МКЭ с применением критерия Кокрофта–Лэтэма (Cocroft–Latham). Анализ проводился моделированием в программе «DEFORM-2D». Моделирование совершалось с различными схемами обжатий от 10 мм до 30 мм за один проход. Предельный критерий Кокрофта–Лэтэма определен при помощи моделирования схемы обжатий, ранее применяемой на СМЗ при которой велика вероятность разрушения плиты. Для анализа влияния величины обжатий провели моделирование прокатки, как с большей величиной обжатий за проход, так и с меньшей. На основе полученных результатов было выявлено, что при увеличении обжатия валков суммарный критерий разрушения уменьшается. На основе расчётов была скорректирована старая схема обжатий, применяемая на СМЗ, в результате чего брак по раскрытию заготовки во время горячей прокатки был снижен с 3 % до 0,1%.

Ключевые слова: DEFORM-2D, АМг5, метод конечных элементов в моделировании, разрушение металла, обработка металлов давлением, деформация.

Горячая прокатка металла является одним из самых популярных способов обработки металлов давлением. Прокатка является важным этапом в производстве металлических изделий, она используется для придания заготовки требуемой формы и размеров, применяется при производстве различных изделий, например, таких как: рельсы, строительные балки, прутковый материал, трубы. В этой работе рассматривается только плоская горячая прокатка, при помощи которой получают плиты, рулоны и листы, востребованные в аэрокосмической промышленности, самолетостроении и машиностроении.

Одной из проблем при производстве катаных полуфабрикатов является разрушение металла в процессе деформации. Накапливаемые при горячей прокатке деформации велики, поэтому материал заготовки, исчерпав

свой ресурс пластичности, после, например, определенного числа проходов начинает разрушаться. Для прогнозирования разрушения при горячей прокатке используют различные критерии разрушения. Существует множество критериев разрушения [1]. В России наиболее популярны деформационные критерии Колмогорова В. Л., Огородникова В.А., Деля Г. Д. [2-3], в зарубежных странах при расчёте вероятности разрушения используют такие критерии как: критерий разрушения Cocroft – Latham, критерий разрушения Johnson-Cook, критерий разрушения Wierzbicki [4-6]. Критерий Кокрофта – Лэтэма (Cocroft – Latham) относится к наиболее распространенным. Анализ публикаций в сети Интернет за последние 5 лет показал, что критерий Кокрофта – Лэтэма упоминается в научно-технической литературе более 2000 раз [7].

© Суздальцев Е. А., Яшин В. В., 2023.

Суздальцев Егор Алексеевич (2021-00937@students.ssau.ru), лаборант ОНИЛ-4,
Яшин Василий Владимирович (Vasiliy.Yashin@samara-metallurg.ru),
старший научный сотрудник ОНИЛ-4 Самарского университета,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Основной причиной такого успеха является простота его использования и минимальное количество данных о свойствах материала, необходимых для расчетов.

Горячая прокатка плит из труднодеформируемых сплавов на СМЗ производится на реверсивном стане за n -количество проходов. Количество проходов зависит от технологичности сплава, мощности оборудования и габаритов заготовки. Не смотря на достаточно большой опыт производства катаной продукции ввиду широкой номенклатуры сплавов и размеров, а также колебания температур нагрева и качества литой заготовки на производстве не решена полностью проблема с разрушением раската во время процесса прокатки. В нештатных ситуациях для снижения риска разрушения операторы стана интуитивно переходят на пониженные обжатия за проход, считая, что ведут прокат по более «мягкой» схеме. Однако, проблема таким способом не решается и даже наоборот разрушение происходит на еще большей толщине.

Данная работа направлена на оценку вероятности разрушения с помощью коэффициента Кокрофта–Лэтэма (Cocroft–Latham) при различных схемах обжатий. Расчёт коэффициента производился с помощью моделирования процесса горячей прокатки, методом конечных элементов в программе DEFORM-2D.

Цель работы – исследование влияния величины обжатий на вероятность разрушения при процессе горячей прокатки плит с высоким очагом деформации с помощью МКЭ, с последующей корректировкой схемы прокатки. Для достижения цели выполнены следующие задачи: выбрана программа и проведено моделирование процесса горячей прокатки, основываясь на данных с промышленного производства определен предельный критерий разрушения Кокрофта–Лэтэма, определены величины обжатий, при которых величина критерия разрушения минимальна.

Условия и методы исследования

Для исследования был выбран сплав системы алюминий-магний – АМг-5. Сплав АМг5 имеет среднюю прочность и пластичность и имеет химический состав, представленный в таблице 1 [8].

В ходе работы было проведено моделирование процесса горячей прокатки плиты с начальной толщины слитка 460 мм и выходной толщины 40 мм при помощи программного комплекса DEFORM-2D. На рисунке 1 заготовка задавалась как абсолютно пластичное тело длиной 1000 мм с количеством конечных элементов – 8000. Реологические свойства материала заготовки были взяты из стандартной библиотеки программного комплекса DEFORM-2D - DIN-AlMg5(600-900F(300-500 °C)). Моделирование проводили при температуре заготовки 480 °C с использованием закона трения по Кулону с коэффициентом трения 0,4. Рабочий валок задан абсолютно жестким телом диаметром 900 мм, скорость движения вала – 2 рад/сек. Для того чтобы завести заготовку в межвалковое пространство использовался толкатель. Так как процесс симметричный, то при исследовании рассматривали только верхнюю половину раската и один валок, а нижнюю ось закрепили от перемещения по оси Y . Известно, что при прокатке слитков шириной от 1400 мм до 2000 мм уширение имеет незначительную величину (не более 50 мм), поэтому моделирование можно проводить в режиме 2 D, со схемой напряженно-деформированного состояния - плоская деформация.

Для оценки влияния величины обжатий на критерий разрушения моделирование проводили по разным схемам. Первая схема соответствовала схеме применяемой ранее на СМЗ. Вторая и третья схемы с обжатиями по 15 мм и 30 мм соответственно (другие параметры не менялись). Четвертая схема содержит пониженные обжатия на первых трех проходах, остальные по 30 мм.

Таблица 1

Химический состав АМг5 по ГОСТ 4784-97, вес. %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Примеси
до 0.5	до 0.5	0.3– 0.8	0.02– 0.1	91.9– 94.68	до 0.1	0.0002– 0.005	4.8– 5.8	до 0.2	прочие, каждая 0.05; всего 0.1

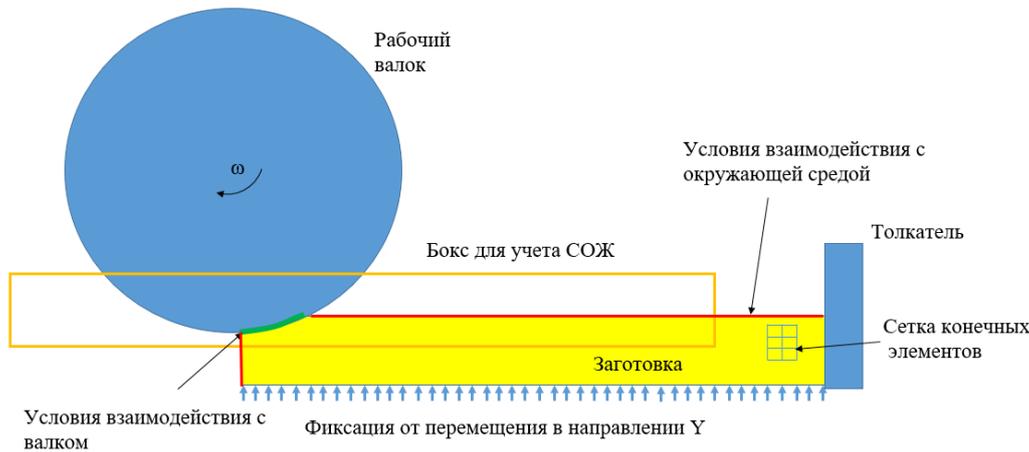


Рис. 1. Моделирование горячей прокатки в программе DEFORM-2D

Результаты теоретических расчетов были сопоставлены с эмпирическими данными. В качестве оцениваемого параметра был выбран критерий разрушения Кокрофта–Лэтэма (Cocroft–Latham), который является показателем предельной деформируемости материала, основанный на оценке полной работы деформации на единицу объема в точке разрушения и рассчитывающийся по формуле [9]:

$$C_{к-л} = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon \quad (1)$$

где ε – накопленная пластическая деформация, $d\varepsilon$ – приращение накопленной деформации, σ_1 – максимальное главное растягивающее напряжение, σ_i – интенсивность напряжений. Разрушение материала наступает в момент, когда показатель поврежденности $C_{к-л}$ достигает предельного значения $C_{пр}$ [10].

Данные моделирования были соотнесены с данными о разрушении слитков при горячей прокатке с СМЗ и найден предельный критерий разрушения Кокрофта–Лэтэма. Величина $C_{пред}$ была взята равной 0,89, именно это расчетное значение получается при моделировании процесса прокатки по режимам принятыми на СМЗ (прокатка слитков из сплава АМг5), на проходе № 18 ($h_0=110$ мм, $h_k=85$ мм), на котором чаще всего происходит разрушение заготовки.

Результаты и их обсуждение

Накопительные коэффициенты критерия Кокрофта–Лэтэма на последних шагах прокатки с выходной толщиной 40 мм представлены в таблице 2.

Уменьшение величины обжатий до 15 мм за проход (схема № 2) приводит к увеличению коэффициента разрушения ($\Sigma C_{к-л}=1,13$), и вместо ожидаемого снижения риска разрушения, наоборот риск разрушения появляется уже на толщине гораздо выше (130 мм), чем при стандартно применяемой схеме. Увеличение величины обжатий до 30 мм за проход (схема № 3) приводит к снижению коэффициента разрушения до $\Sigma C_{к-л}=0,88$ к значению менее 1, а следовательно и снижению риска разрушения на протяжении всего цикла прокатки.

Различия в рассчитанных коэффициентах объясняются отличиями в схеме напряженного состояния. На рисунке 2 представлены результаты моделирования горячей прокатки заготовки с толщины 460 мм до 430 мм, с разной величиной обжатий за проход. Моделирование показало, что напряжения действующие на заготовку при одном проходе в 30 мм распространяются в заготовке более равномерно, чем при двух последовательных прохода в 15 мм. При втором обжатии в 15 мм максимальное напряжение в заготовке составило 133 МПа, а при обжатиях в 30 мм максимальное напряжение при прокатке 108 МПа.

Таблица 2

Суммарные коэффициенты критерия Кокрофта–Лэтэма

Номер схемы	Примечания	Кол-во проходов	$\Sigma C_{к-л}$
1	СМЗ	20	0,96
2	15 мм	28	1,13
3	30 мм	14	0,88
4	Рекомендованная	20	0,88

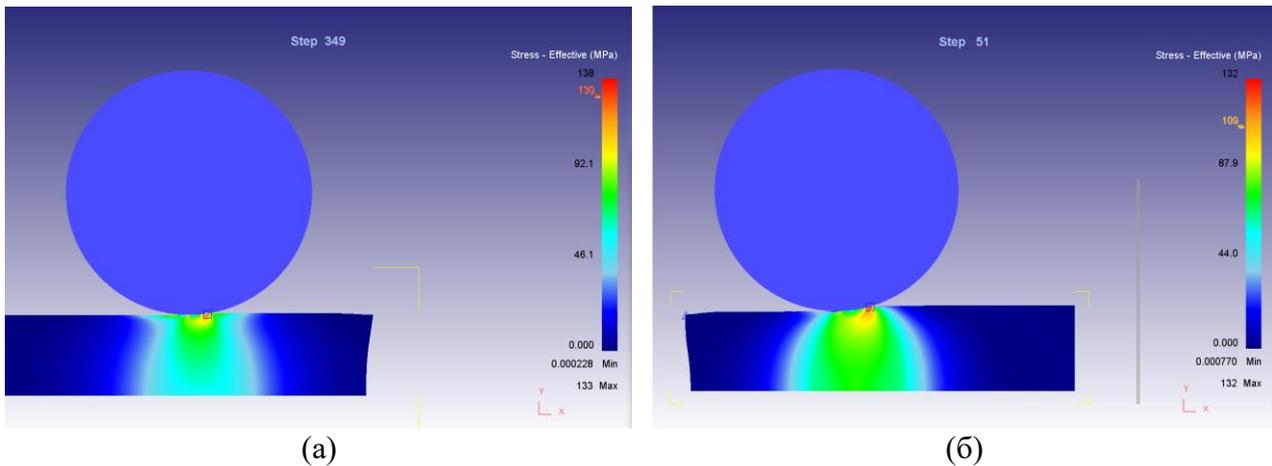


Рис. 2. Интенсивность напряжений при величине абсолютного обжатия: (А) 15 мм; (Б) 30 мм

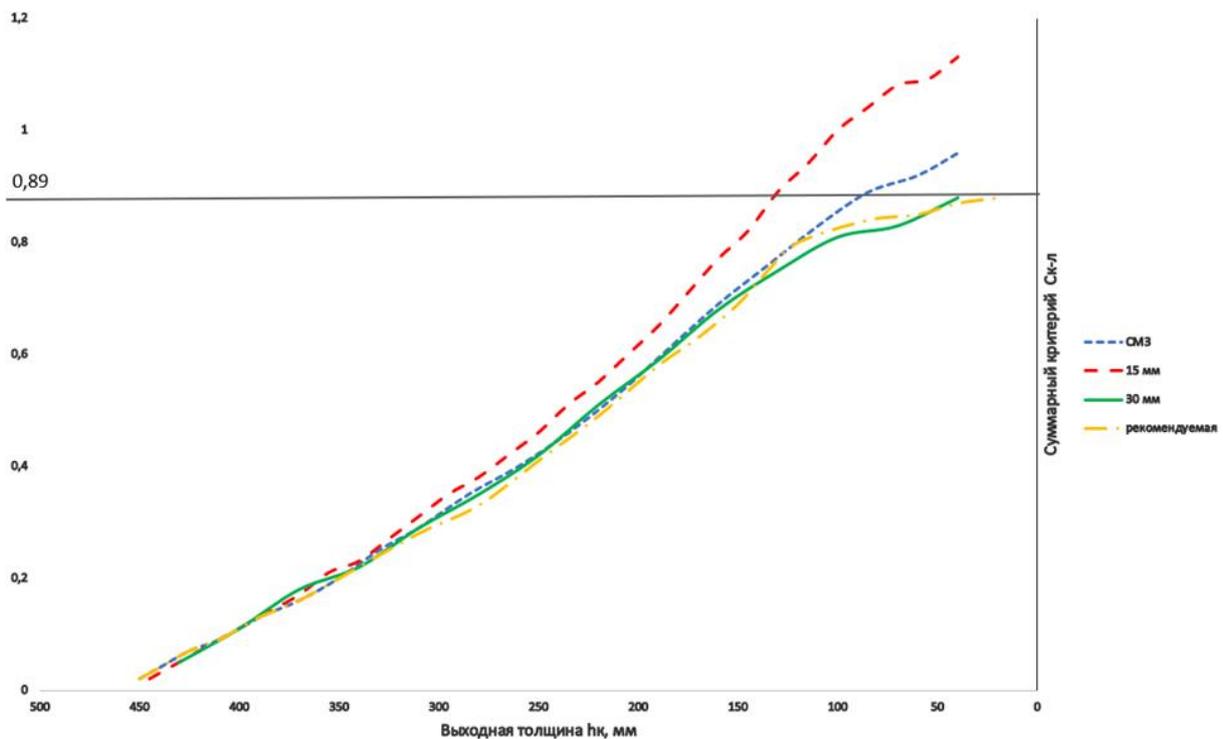


Рис. 3. Значение Σ_{k-l} от выходной толщины в зависимости от схемы обжатий

При уменьшении величины обжатий увеличивается неравномерность деформаций, а, следовательно, и неравномерность напряжений. Растягивающие напряжения в центре заготовки принимают значения выше предела прочности. Поэтому для снижения вероятности разрушения, необходимо увеличить равномерность деформаций по высоте сечения, это возможно за счет увеличения величины обжатия. Однако ввиду высокой нагрузки на двигатель при прокатке крупногабаритных слитков на первых проходах схема № 3 не пригодна, поэтому была разработана схема прокатки № 4 с разными обжатиями (первые три прохода

по 10 мм остальные по 30 мм). Такая схема обжатий снижает нагрузку на оборудование, а расчёты показывают, что накопительный критерий Кокрофта-Лэтэма Σ_{k-l} остается таким же как и на схеме № 3 (не превышает значения 0,88). Количество проходов в рекомендованной схеме обжатий = 20, такое же как и при ранее используемой схеме № 1.

Предельный суммарный критерий для данных условий = 0,89. На рисунке 3 изображён график с нанесением на него зависимости каждой из 4 схем обжатий, где видно, как менялся суммарный коэффициент с каждым шагом прокатки.

Заключение

Расчетами показано, что при уменьшении обжатий до 15 мм (схема 2) за проход величина критерия Ск-л достигает предельных значений в районе толщины 130 мм, а при увеличении обжатий до 30 мм (схема 3), критерий во время всего цикла не превышает величины 0,88. Можно сделать вывод, что при увеличении обжатий суммарный коэффициент уменьшается. Схема прокатки с повышенными обжатиями позволяет значительно снизить количество брака и сократить число проходов, однако данные проходы будут осуществляться с повышенными нагрузками на приводе и на предельных величинах усилия прокатки, поэтому целесообразно комбинировать величины обжатий. Была создана и внедрена в производственный процесс рекомендованная схема проката (схема 4), в результате чего брак по раскрытию заготовки на СМЗ во время горячей прокатки был снижен с 3% до 0,1%.

Литература

1. Calibration and evaluation of seven fracture models / T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.-W. Lee, Yuanli [et al.] // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. P. 719-743.
2. Федотов В. А. Выбор критериев разрушения в задачах обработки металлов давлением // *Вестник Хмельницкого национального университета Технические науки*. 2014. № 6(219). С. 20-26.
3. Огородников В. А. Холодне комбіноване видавлювання. М.: ВНТУ, 2011. 180 с.
4. Харитонов В. А. Влияние геометрических параметров очага деформации на разрушение проволоки при волочении // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2013. № 1 С. 33-39.
5. Ductile fracture simulation for A106 Gr.B carbon steel under high strain rate loading condition, *Recent Advances in Structural Integrity Analysis—Proceedings of the International Congress*. / H. S. Nam, J. S. Kim, J. J. Han, [et al.] // Woodhead Publishing. 2014. P. 37-41.
6. Bai Y., Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence // *International Journal of Plasticity*. 2008. Vol. 24. № 6. P. 1071–1096.
7. Власов А. В. О применении критерия Кокрофта – Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объемной штамповке // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 11-1. С. 46-58.
8. ГОСТ 4784-2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки (EN 573-3:2013, NEQ), (ISO 209:2007, NEQ) [Текст]. Введ. 2019-01-09. М.: Издательство стандартов, 2019. 30 с.
9. Матвеев М. А. Оценка вероятности разрушения металла при горячей пластической деформации с помощью критерия Кокрофта – Латама // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 2. С. 109-126.
10. Валеева А. Х. О влиянии значения критерия Кокрофта-Лэтэма на прогноз разрушения материала при компьютерном моделировании в среде DEFORM-2D // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2018. Т. 15. № 3. С. 328-332.

ANALYSIS OF THE DESTRUCTION OF THE WORKPIECE DURING HOT ROLLING USING THE DESTRUCTION MODEL COCROFT-LATHAM

E. A. Suzdalcev, V. V. Yashin

In this article, the influence of the compression scheme during hot rolling on the total Cocroft–Latham criterion (Cocroft–Latham) was studied. In the "DEFORM-2D" program, modeling of hot rolling of the AMg-5 plate was performed using FEM. The simulation was performed with the size of the roll compressions from 10 mm to 30 mm, the compression scheme used on the SMZ was modeled and the maximum total Cockcroft-Latham criterion for the AMg-5 alloy was experimentally calculated. Rolling schemes with 30 mm and 15 mm compressions were also modeled. Based on the results obtained, it was revealed that with an increase in the compression of the rolls, the total destruction criterion decreases. Based on the calculations, the old compression scheme used at the SMZ was adjusted, as a result of which the defect in opening the workpiece during hot rolling was reduced from 3% to 0.1%.

Key words: DEFORM 2D, AMg-5, finite element method in modeling, metal destruction, metal processing by pressure, deformation.

Статья поступила в редакцию 19.06.2023 г.