

*Л. М. Гуревич¹, А. И. Банников¹, О. А. Макарова¹, А. В. Красиков², А. С. Жуков³
С. А. Стручков³, А. С. Губарев¹, А. А. Кожевникова¹, А. В. Златкевич¹*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗУБЬЕВ ПИЛЫ
ДЛЯ ТЕРМОФРИКЦИОННОГО РЕЗАНИЯ
МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

¹ Волгоградский государственный технический университет

² АО «Волгоградский трубный завод»

³ АО «Корпорация «Красный Октябрь»

e-mail mv@vstu.ru

В данном исследовании рассмотрены результаты компьютерного 3D-моделирования термофрикционного процесса, происходящего между зубьями пильного диска из стали 50ХГФА и заготовкой из стали 45. Модели были созданы с использованием программного пакета SIMULIA/Abaqus для анализа изменений температуры на контактирующих поверхностях зубьев и пластины в условиях пластического деформирования. В рамках работы проанализированы различные нагрузки на зубья и их влияние на температурные параметры, выделение тепла и физические свойства материалов. Результатом моделирования установлено, что оптимальной нагрузкой для зубьев при температурах пластины от 400 до 600 °С является величина 3,1 кН. Данный режим позволяет предотвратить чрезмерный нагрев зубьев, поскольку температура их поверхности не превышает 650 °С после прохождения 250 мм – критической длины зоны контакта при пакетной резке

Ключевые слова: температура, деформация, зубья, пильный диск, моделирование, метод конечных элементов

© Гуревич Л. М., Банников А. И., Макарова О. А., Красиков А. В., Жуков А. С., Стручков С. А., Губарев А. С., Кожевникова А. А., Златкевич А. В., 2024.

*L. M. Gurevich¹, A. I. Bannikov¹, O. A. Makarova¹, A. V. Krasikov², A. S. Zhukov³
S. A. Struchkov³, A. S. Gubarev¹, A. A. Kozhevnikova¹, A. V. Zlatkevich¹*

DETERMINATION OF THE TEMPERATURE OF THE SAW TEETH FOR THERMAL FRICTION CUTTING BY COMPUTER SIMULATION

¹Volgograd State Technical University

²JSC Volgograd Pipe Plant

³JSC "Red October Corporation"

In this study, the results of computer 3D modeling of the thermal friction process occurring between the teeth of a saw blade made of 50XGFA steel and a billet made of 45 steel are considered. The models were created using the SIMULIA/Abaqus software package to analyze temperature changes on the contacting surfaces of teeth and plates under plastic deformation conditions. As part of the work, various loads on the teeth and their effect on temperature parameters, heat generation and physical properties of materials are analyzed. As a result of the simulation, it was found that the optimal load for the teeth at plate temperatures from 400 to 600 °C is 3.1 kN. This mode prevents excessive heating of the teeth, since their surface temperature does not exceed 650 °C after passing 250 mm, the critical length of the contact zone during batch cutting

Keywords: temperature, deformation, teeth, saw blade, modeling, finite element method

Введение

На многих металлургических предприятиях широко используется высокоскоростное термофрикционное резание металлопроката дисковыми пилами. Это обусловлено высокой производительности процесса резания, простотой технологической операции, а также относительной дешевизной пильного диска, изготавливаемого из пружинно-рессорной среднелегированной стали. Пильные диски, используемые для резки холодного и горячего металлопроката, имеют различную геометрию режущей части: сплошные диски, диски с трапецеидальными или треугольными зубьями. Основным недостатком этого вида обработки является повышенный износ пил и значительное ухудшение качества реза [1–5].

Термофрикционное резание представляет собой разновидность обработки металлов резанием с нагревом. Силы трения в зоне контакта быстровращающегося инструмента с заготовкой [2, 3, 5] вызывают выделение тепла и нагрев заготовки, с образованием контактного слоя с пониженной прочностью. Разупрочненный поверхностный слой заготовки удаляется либо микронеровностями на периферии диска пилы, либо вершинами зубьев.

В трубопрессовом цехе ТПЦ – 2 АО «Волжский трубный завод» при производстве бесшовных труб используется пакетная резка труб, поступающих из охладителя, салазковой пилой, относящаяся к термофрикционному резанию холодного трубопроката. Обрезается головная и хвостовая часть труб, а также производится разрезка труб на заданные размеры.

Для закрепления и формирования пакета заготовок используются специальные зажимные приспособления. Трубы прижимаются

к противоположной стенке лотка и распределяются в зависимости от диаметра в объеме, образованном горизонтальными прижимами, стенкой и нижними и верхними прижимами.

При высокоскоростном резании дисковой пилой пакетного резания наблюдается образование крупных заусенцев, прочно прикрепленных к телу заготовки, а также значительный износ пильного диска. Происходит заплывание впадин зубьев пилы и их деформация, что приводит к потере режущих свойств инструмента. Отдельные сильнодеформированные зубья имеют значительные поперечные трещины. Деформация и износ по периферии одного диска крайне неравномерна: отдельные зубья пилы изношены значительно больше других.

Согласно требованиям к выпускаемой продукции в условиях производства АО «Волжский трубный завод», торец трубы должен быть чистым, не иметь утолщений, трещин, вмятин, наплывов металла и др. Качество торца заготовок после резания дисковой пилой холодного или горячего металлопроката оценивается наличием заусенца на торце и такими параметрами как размеры сечения заусенца и длина заусенца. Значительный разогрев металла в околоконтактной зоне является причиной формирования заусенца. Износ зубьев пилы увеличивает вероятность формирования заусенца на торце трубы, а повышение стойкости инструмента способствует отрыву заусенца [2, 4].

Для обеспечения минимальной интенсивности износа инструмента и качества торца при пакетной резке необходимо достоверное описание протекающих процессов выделения тепла при трении и деформации в зоне резания, и его распределения в обрабатываемый материал и зубья пильных дисков. Особенно это акту-

ально при резке проката из высоколегированных сталей сопровождающейся повышенным износом пил. Необходимо учитывать влияние температуры на прочностные характеристики различных материалов.

Одним из методов исследования температурных процессов, протекающих в материале, является исследование микроструктуры металла зубьев пилы и заусенца [6, 7]. Повышение температуры в зоне обработки вызывает структурные изменения как в инструменте, так и в обрабатываемом материале, что позволяет охарактеризовать условия работы инструмента. Такие исследования достаточно информативны, но трудоемки и не позволяют провести анализ непосредственно в процессе резания.

Несмотря на проведенные исследования и математическое описание процессов высокоскоростного термофрикционного резания [2, 3, 5], вопрос формирования температурных полей в разрезаемой заготовке и инструменте является недостаточно изученным.

Высокая скорость процессов, протекающих при резании со скоростью около 100 м/с, создает большие трудности при проведении экспериментов, которые могут определить величину тепловыделения и направление тепловых потоков.

Для прогнозирования результатов и снижения затрат на натурный эксперимент необходимо использование численных методов, таких как метод конечных элементов.

В ранее проведенных исследованиях с использованием численных методов [8–10] проводилось моделирование процесса стружкообразования и распределения температуры по толщине стружки и зуба пилы при высокоскоростном резании цилиндрических заготовок, а также моделирование процесса образования заусенца при термофрикционном резании и определение напряжений и температуры в зоне его формирования. Эти исследования позволили обосновать модернизацию геометрии пильных дисков для повышения качества торца го-

рячего проката с помощью пакета программ Deform 3D.

Целью настоящей работы является исследование методами компьютерного моделирования термофрикционного резания с помощью методов конечных элементов в программном комплексе Abaqus и определение напряжений и температуры в зоне контактного взаимодействия зубьев пилы и обрабатываемого материала.

Методика проведения компьютерного моделирования

В данном исследовании приведены результаты компьютерного 3D моделирования с использованием пакета программ SIMULIA/Abaqus изменения температуры на контактирующих задних поверхностях трапециевидных зубьев пильного диска из стали 50ХГФА и разрезаемой заготовки из стали 45. Моделирование процесса пластического деформирования проводилось с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Dassault Systemes), использующего явную схему интегрирования для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов. Используемая схема процесса показана на рис. 1. По поверхности пластины из стали 45 шириной 6 мм перемещались со скоростью 150 м/с 8 зубьев из стали 50ХГФА с размерами опорной площадки $2 \times 3 \text{ мм}^2$ и расстоянием между зубьями 12 мм. Моделировались три серии вариантов с усилиями прижима зубьев к поверхности пластины 3,1, 4,7 и 9,4 кН. Материалы элементов деформируемой системы задавались изотропными с повышающимися пределами текучести $\sigma_{0,2}$ при росте локальной пластической деформации. Для расчета изменения предела текучести материалов пилы и разрезаемой пластин в результате пластического деформирования при различных температурах и скоростях деформирования использовали модели пластичности Джонсона–Кука [10], значения которой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты модели пластичности Джонсона–Кука для использованных сталей

Материал	Коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука							
	A, МПа	B, МПа	m	n	$\dot{\epsilon}_0, \text{с}^{-1}$	T_m, K	T_r, K	C
Сталь 45	410	280	1,1	0,47	1	1800	293	0,03
Сталь 50ХГФА	1539	477	1,0	0,18	1	1800	293	0,012

Зависимости теплофизических свойств сталей (теплоемкость и теплопроводность) от температуры (табл. 2) при моделировании принимались по данным [12, 13].

Расчет проводился с учетом выделения тепловой энергии в зоне трения и ее перераспределения между зубом пилы и поверхностью пластины. Для расчета процессов выработки тепла

использовались условия по умолчанию алгоритма Heat Generation, встроенного в модуль Abaqus/Explicit. При моделировании использовался коэффициент трения, равный 0,3, не зависящий от температуры, что может вызывать значительные погрешности вблизи температуры плавления, где прочность когезионных связей может оказаться ниже, чем силы трения.

Таблица 2

Зависимость теплофизических свойств сталей от температуры

Температура, °С	Теплоемкость C , Дж/(кг·°С)		Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	
	Сталь 45	Сталь 50ХГФА	Сталь 45	Сталь 50ХГФА
100	469	498	48	48
300	503	561	44	44
500	574	664	39	39
700	615	700	31	31
900	787	624	26	26
1100	800	645	25	25
1300	810	669	24	24
1500	816	670	23	23

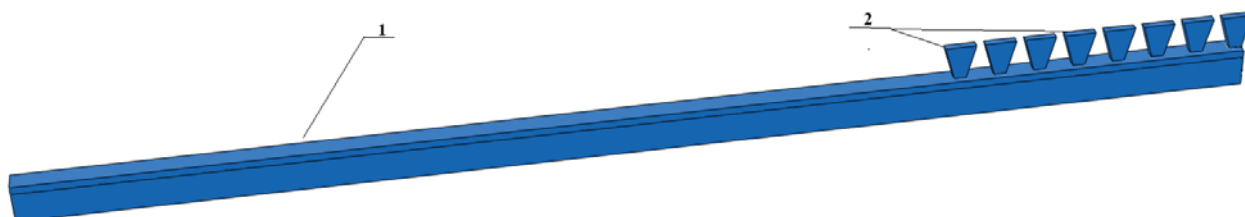


Рис. 1. Схема модели:

1 – пластина из стали 45; 2 – зубья пильного диска из стали 50ХГФА

Для расчета процессов выработки тепла использовались условия по умолчанию алгоритма Heat Generation, встроенного в модуль Abaqus/Explicit.

Были исследованы три варианта фрикционного контакта на зубья пильного диска при усилиях на каждый зуб 3,1, 4,7 и 9,4 кН, в процессе которых определяли изменение температуры зубьев и пластины в зависимости от длины пройденного пути:

1-й вариант – начальные температуры зубьев 20 °С и пластины 400 °С;

2-й вариант – начальные температуры зубьев 20 °С и пластины 600 °С;

3-й вариант – начальные температуры зубьев 20 °С и пластины 800 °С.

На рисунках 2–4 показано изменение средних температур поверхностей пластины, первого, четвертого и восьмого зуба по мере роста длины пройденного пути. Различия между тем-

пературами поверхностей разных зубьев может быть связана с постепенным прогревом поверхности пластины по мере прохождения предыдущих зубьев. Результаты моделирования процессов при 1-м варианте фрикционного контакта показали интенсивный нагрев задней поверхности зуба контактирующей с обрабатываемым материалом пластины при нагрузке на зуб 9,4 кН (рис. 2, в), средняя температура которой после прохождения 300 мм фрикционного контакта достигала 1950 °С, что превышает температуру плавления материала в 1450–1520 °С после прохождения 210 мм. Причина такой возможности, как было указано выше, связано с принятым постоянством коэффициента трения. Изменение температуры контактирующей поверхности пластины от 400 до 520 °С практически не влияло на скорость нагрева контактирующей поверхности зуба, что указывает на определяющее влияние в нагреве зуба давления

прижима и, в результате, теплоты, выделяемой непосредственно в зоне трения, что подтверждается также проведенными ранее исследованиями.

Основной проблемой при термофрикционной обработке пильными дисками холодного металла является недостаточный нагрев обрабатываемого материала и перегрев зубьев пильного диска, т. е. при большей длине зоны контакта повышение температуры поверхности зуба пилы приводит к ее пластической деформации за счет того, что предел текучести становится ниже напряжений на границе зуб-пластина.

Анализ влияния приложенной нагрузки показал, что с увеличением усилия прижима зубьев пилы потеря их стойкости будет происхо-

дить быстрее, что объяснимо более интенсивным процессом тепловыделения в зоне резания.

Моделирование показало что предпочтительным усилием на зуб при температурах пластины 400–800 °С будет усилие 1,2 кН (рис. 2, *а*), так как хоть и процесс нагрева зуба идет намного быстрее чем нагрев пластины, но после прохождения 250 мм (то есть максимальной длины зоны контакта при пакетной резке в условиях ТПЦ – 2 АО «Волжский трубный завод») не превышает 650 °С. При усилиях 3,1 и 4,7 кН (рис. 2–4) при максимально возможной длине контакта зуба с обрабатываемым металлом 250 мм по мере прогрева разрезаемого металла температура зубьев достигает практически точки плавления стали (1500 °С).

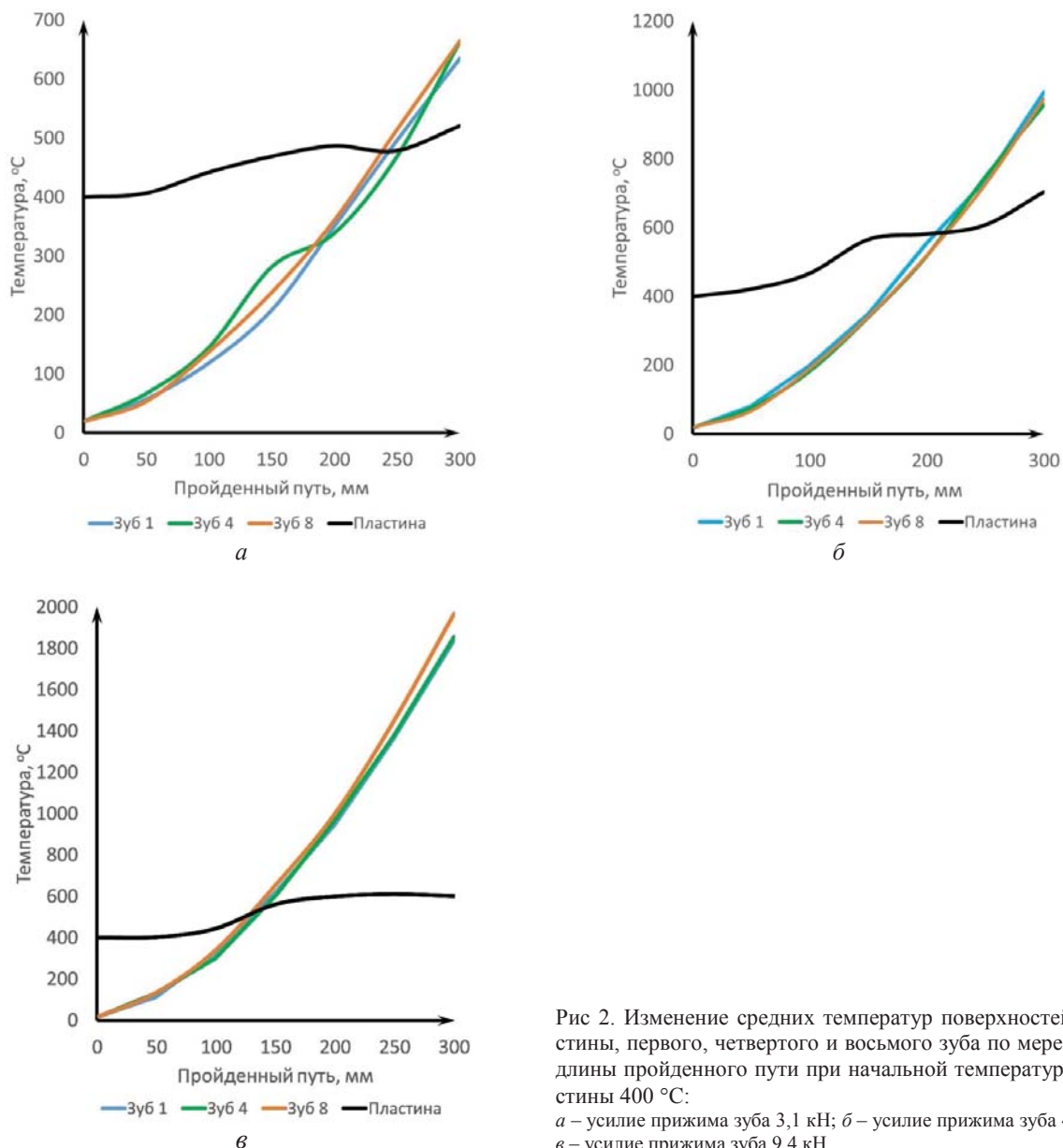


Рис 2. Изменение средних температур поверхностей пластины, первого, четвертого и восьмого зуба по мере роста длины пройденного пути при начальной температуре пластины 400 °С:

а – усилие прижима зуба 3,1 кН; *б* – усилие прижима зуба 4,7 кН; *в* – усилие прижима зуба 9,4 кН

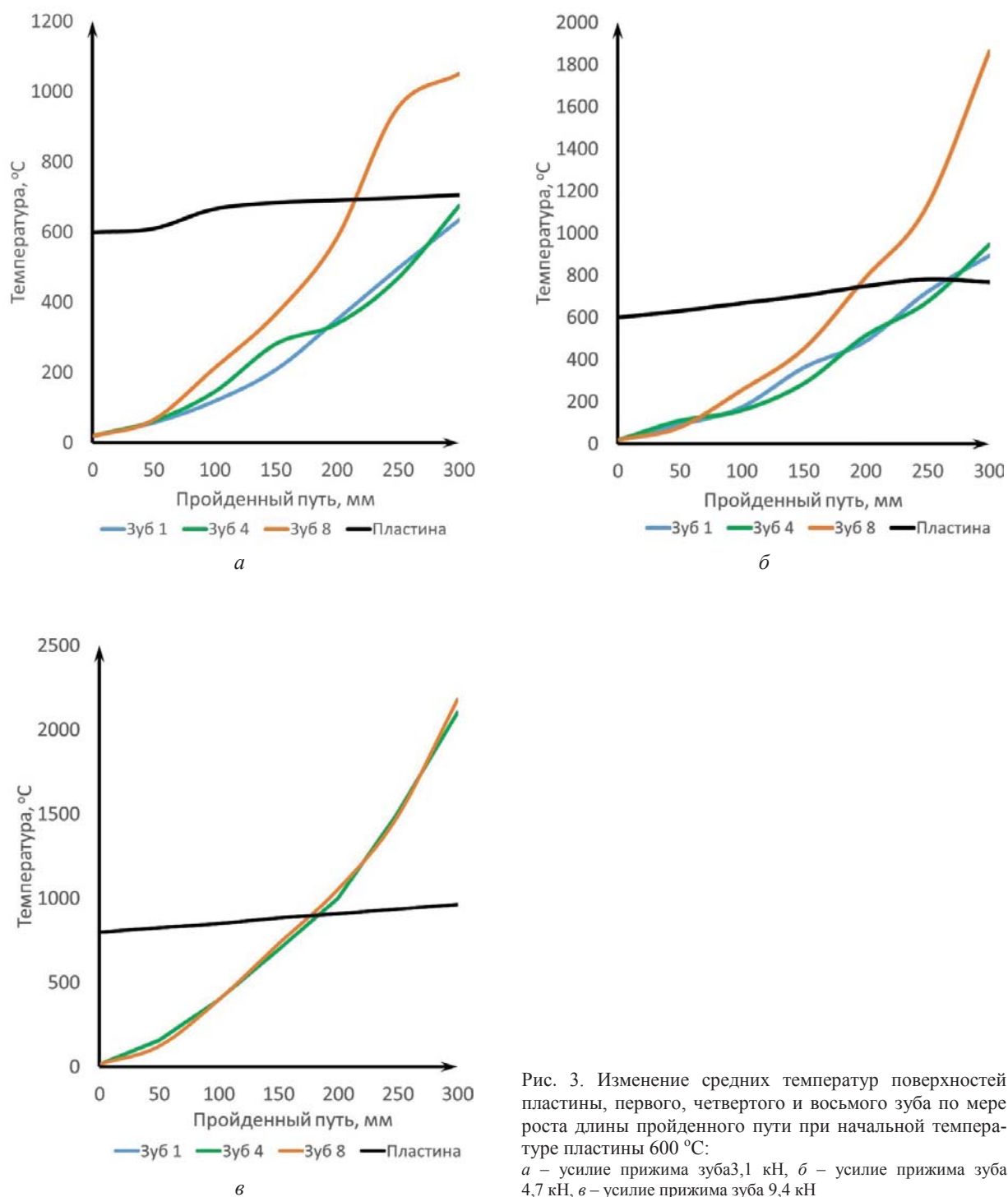


Рис. 3. Изменение средних температур поверхностей пластины, первого, четвертого и восьмого зуба по мере роста длины пройденного пути при начальной температуре пластины 600 °С:

а – усилие прижима зуба 3,1 кН, б – усилие прижима зуба 4,7 кН, в – усилие прижима зуба 9,4 кН

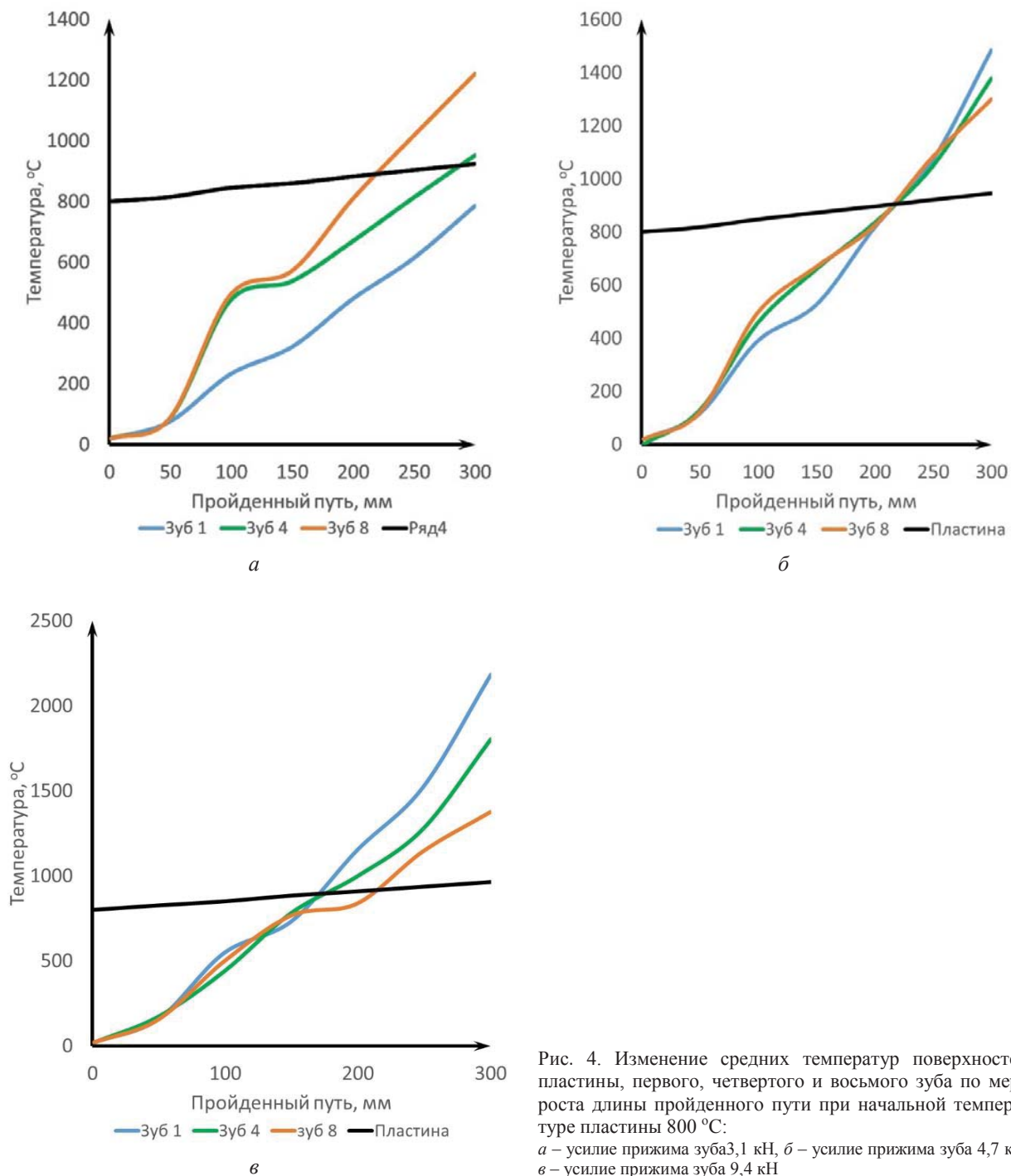


Рис. 4. Изменение средних температур поверхностей пластины, первого, четвертого и восьмого зуба по мере роста длины пройденного пути при начальной температуре пластины 800 °С:

а – усилие прижима зуба 3,1 кН, *б* – усилие прижима зуба 4,7 кН, *в* – усилие прижима зуба 9,4 кН

Как видно из рис. 4, при начальной температуре разрезаемой пластины 800 °С она на пути трения 300 мм 8 проходящими зубьями нагревается до 963 °С при нагрузке на зуб 9,4 кН, в то время как зубья нагревались на этом пути трения почти до температуры плавления. Это связано со значительным интервалом во времени между прохождением по локальному участку пластины каждого зуба, который при выбранной конструкции пилы превышает время

трения зуба об пластину почти в 2 раза. Для повышения интенсивности нагрева пластины необходимо максимально увеличивать длину задней поверхности зубьев пилы.

Выводы

1. Методами конечно-элементного компьютерного моделирования в пакете программ SIMULIA/Abaqus проведен анализ термофизических процессов, учитывающий генерацию

теплоты в процессе фрикционного контакта задней поверхности зубьев пильного диска и поверхности заготовки при скоростях резания около 100 м/с, с учетом влияния термофизических характеристик сталей от температуры резания.

2. Моделирование показало что предпочтительным усилием на зуб при температурах пластины 400–800 °С будет нагрузка в 3,1 кН, так как хотя и процесс нагрева зуба идет намного быстрее чем нагрев пластины, но после прохождения 250 мм (то есть максимальной длины зоны контакта при пакетной резке в условиях ТПЦ – 2 АО «Волжский трубный завод») температура поверхности зуба не превышает 650 °С.

3. Анализ проведенного моделирования показал, что одним из путей достижения интенсификации выделения тепла в обрабатываемой поверхности является увеличение длины задней поверхности зубьев и уменьшение расстояния между ними. Данная проблема требует дальнейшего анализа с использованием моделей пил с модифицированной геометрией режущей части.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Насад, Т. Г. Высокоскоростная обработка труднообрабатываемых материалов с дополнительными потоками энергии в зоне резания : монография / Т. Г. Насад, А. А. Игнатьев ; Сарат. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2002. – 112 с.
2. Банников, А. И. Теоретические основы модернизации термофрикционных пил для резки горячего трубопровода : монография / А. И. Банников ; ВолГТУ. – Волгоград, 2014. – 135 с.
3. Кравченко, О. С. Деформационные и тепловые явления в зоне термофрикционного резания металла / О. С. Кравченко, Н. И. Покинтелица // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18. – № 1.
4. Банников, А. И. Повышение эффективности термофрикционной резки трубопровода / А. И. Банников, А. А. Банников, А. И. Курченко, Н. А. Дятлов, И. Л. Пермяков // СТИН, 2010. – № 10. – 34–37 с.
5. Сизый, Ю. А. Нагрев диска при фрикционной резке проката / Ю. А. Сизый // Известия вузов. Машиностроение, 1987. – № 1. – С. 111–115.
6. Макарова, О. А. Исследование нагрева зуба традиционной пилы пакетного резания с использованием металлографического анализа / О. А. Макарова // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 2 (128). – С. 44–48. – DOI: 10.30987/2223-4608-2022-2-44-48.
7. Макарова, О. А. Исследование микроструктуры заусенцев на торцах заготовок при пакетном резании дисковой фрезой / О. А. Макарова // Известия ВолГТУ : научный журнал № 1 (260) / ВолГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 23–29.
8. Банников, А. И. Исследование распределения тепла в зубе пилы с учетом периодичности процесса при пакетной резке холодного металлопроката / А. И. Банников [и др.] // Известия ВолГТУ : научный журнал № 8 / ВолГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 7–13.
9. Гуревич, Л. М. Моделирование высокоскоростного резания в Deform 3D / Л. М. Гуревич, Р. Е. Новиков, А. Г. Серов // Известия ВолГТУ : научный журнал № 9 (188) / ВолГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 60–64.
10. Исследование термо-деформированного состояния зубьев пилы пакетной резки с использованием МКЭ / Л. М. Гуревич, А. И. Банников, О. А. Макарова, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев, А. С. Губарев, Д. В. Шагоян, Н. В. Трутнев, А. В. Красиков // Известия ВолГТУ : научный журнал № 2 (261). – Волгоград, 2022. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 40–45.
11. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: справочник / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.
12. Гуревич, Л. М. Моделирование процессов деформирования слоистых титано-алюминиевых композитов в процессе изгиба / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, В. М. Волчков, О. С. Киселев, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолГТУ. – Волгоград, 2012. – С. 11–15.
13. Фрункин, Д. Б. Применение системы CAE-моделирования MSC. MARC для оптимизации технологии формообразующих операций на производстве сварных прямошовных труб большого диаметра АО «Волжский трубный завод» / Д. Б. Фрункин, Л. М. Гуревич, И. Л. Пермяков, А. С. Христофоров, П. П. Титаренко // Известия ВолГТУ : научный журнал № 8 / ВолГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 103–110.
14. Алимов, А. И. Совершенствование технологии изготовления колец из титанового сплава ВТ6 путем определения рациональных режимов деформирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.02.09) / Алимов Артем Игоревич ; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. – Москва, 2017. – 16 с.
15. Алиев, И. С. Получение полых сложнопровольных изделий ковкой из слитков / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков, С. В. Мартынов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 121–130.