

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-9-14



УДК 621.9

UDC 621.9

2.5.5 – технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ КИПЕНИЯ
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

✉¹ **Каюшин Егор Сергеевич**,
студент, кафедра инструментальной техники
и технологии, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, e-mail: kay.yegor@internet.ru

Зубков Николай Николаевич,
д.т.н., профессор кафедры инструменталь-
ной техники и технологии, МГТУ им. Н.Э.
Баумана, г. Москва.

Аннотация. В работе выполнено конечно-элементное моделирование процесса формирования микроструктурированных поверхностей кипения с подповерхностными полостями методом обкатывания накатным роликом оребренной поверхности, полученной деформирующим резанием. Целью исследования являлась оценка точности воспроизведения параметров получаемого микрорельефа при использовании программного комплекса *DEFORM-3D*. Показано, что расчётные значения основных геометрических параметров удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, а расхождение не превышает 4 %. Полученные результаты подтверждают возможность применения конечно-элементного моделирования для прогнозирования формы микроструктурированных поверхностей, предназначенных для интенсификации теплоотдачи при кипении различных жидкостей.

**MODELING OF THE FORMATION
PROCESS OF MICROSTRUCTURED
BOILING SURFACES USING THE FINITE
ELEMENT METHOD**

✉¹ **Kayushin Egor Sergeevich**,
student, department of instrumentation and tech-
nology, Bauman moscow state technical university,
Moscow, e-mail: kay.yegor@internet.ru

Zubkov Nikolai Nikolaevich,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of tool technics, Bauman Moscow state
technical university, Moscow.

Annotation. The article presents finite element modeling of the process of forming microstructured boiling surfaces with subsurface cavities by the knurling method using a rolling roller on a finned surface obtained by deformational cutting. The aim of the study was to assess the accuracy of reproducing the parameters of the resulting micro-relief using the *DEFORM-3D* software package. It is shown that the calculated values of the main geometric parameters are in satisfactory agreement with the experimental data, and the discrepancy does not exceed 4 %. The obtained results confirm the possibility of using finite element modeling to predict the shape of microstructured surfaces intended for enhancing heat transfer during boiling of various liquids.

Ключевые слова: ДЕФОРМИРУЮЩЕЕ РЕЗАНИЕ, ПУЗЫРЬКОВОЕ КИПЕНИЕ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА, ПОДПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОЛОСТИ. **Keywords:** DEFORMATION CUTTING, POOL BOILING, HEAT TRANSFER ENHANCEMENT, SUBSURFACE CAVITIES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсификация теплоотдачи при кипении рабочих жидкостей на тепловыделяющих поверхностях является одной из ключевых задач при разработке компактных и высоконагруженных теплообменных аппаратов и систем охлаждения. Особый интерес представляют микроструктурированные поверхности, способные увеличивать плотность активных центров парообразования и повышать критический тепловой поток. В последние годы активно исследуются поверхности с различным микрорельефом, включая структуры, формируемые методом деформирующего резания [1, 2]. Этот метод позволяет значительно увеличивать площадь теплообмена и создавать полуоткрытые подповерхностные поры, которые эффективно функционируют в режиме кипения. Повышение эффективности достигается за счёт комбинирования предварительного оребрения и последующей пластической обработки поверхности обкатыванием накатным роликом [3, 4], что приводит к формированию пористого микрорельефа с частично перекрытыми подповерхностными полостями.

Получение заданных геометрических параметров теплообменной структуры осуществляется подбором технологических параметров накатки в ходе экспериментальных апробаций. Данный подход требует значительных материальных и временных затрат для получения заданных подповерхностных структур. Альтернативным вариантом является использование современных CAE-систем моделирования технологических процессов, основанных на методе конечных элементов [5]. Для оценки достоверности результатов моделирования необходима сравнительная количественная оценка результатов моделирования и реально получаемого макрорельефа. Ранее были проведены работы по CAE-моделированию формирования оребрения [6], включая сравнительные исследования с использованием *DEFORM-3D* и других программных комплексов [7].

Тем не менее, систематические данные о применении этих методов именно для формирования микроструктурированных поверхностей кипения на медных трубах с предварительно сформированным оребрением, а также о сопоставлении расчётной геометрии с экспериментальными результатами, практически отсутствуют.

В связи с этим настоящая работа посвящена конечно-элементному моделированию процесса формирования микроструктурированных поверхностей кипения методом обкатывания накатным роликом по оребрённым медным трубам. Основная цель исследования заключается в оценке точности воспроизведения геометрических параметров макрорельефа и проверке применимости численного моделирования для прогнозирования формы поверхностей, предназначенных для интенсификации теплоотдачи при кипении различных жидкостей.

2 Материалы и методы

Проверка адекватности полученных моделированием геометрических параметров поверхностей кипения проводилась их сравнением с реально полученной поверхностью на образце [3]. Этапы при моделировании были следующие: проектирование геометрии накатного ролика и заготовки, расположение созданных объектов в пространстве относительно друг друга, выбор инструментального материала и материала заготовки, выбор режимов накатывания (величина заглубления ролика, обороты шпинделя). Моделировался процесс накатывания при обработке чистой меди.

В качестве референсов для 3D-моделей были взяты реально полученное оребрение и реальный профиль накатного ролика. На рис. 1 представлено профилирование зуба накатного ролика по фото. Его диаметр – 19,05 мм. На рис. 2 представлено профилирование ребра из эксперимента [3] по фотографии. Шаг ребра – 0,1 мм. Восстановленная по микрофотографиям высота ребра составила 205 мкм, что согласуется с номинальным значением 220 мкм, указанным авторами. Для уменьшения машинного времени в симуляции использована не полноразмерная заготовка, а только ее участок, непосредственно участвующий в процессе деформирования накатным роликом.

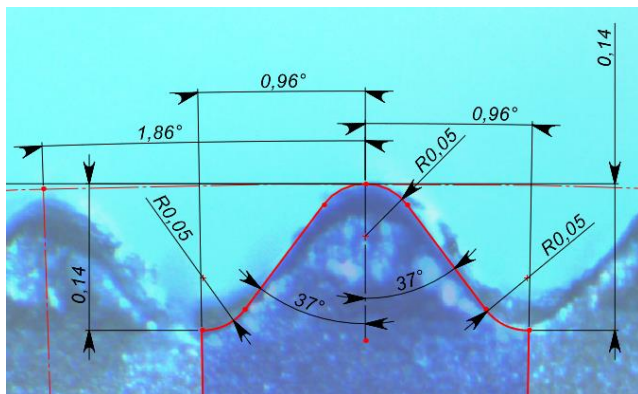


Рисунок 1 – Профилирование зуба накатного ролика

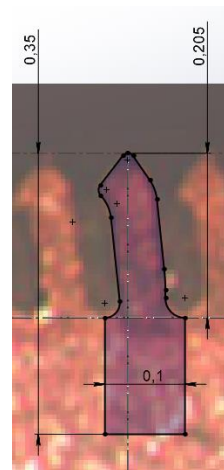


Рисунок 2 – Профилирование ребра

Накатка моделировалась как абсолютно твердое тело. Заготовка – как деформируемое. Фиксация заготовки осуществлялась по плоскости, представленной на рис. 3. Все движения были рассмотрены относительно заготовки, следовательно, движение накатного ролика было задано двумя вращениями: вокруг оси заготовки Z_1 и вокруг своей оси Z_2 . Зацепление ролика с заготовкой было рассмотрено как взаимное вращение двух дисков без проскальзывания. На рис. 4 представлена общая схема, где показаны начальные положения инструмента и заготовки, а также движения ролика, где ω_1 равна числу оборотов шпинделя в минуту, а ω_2 рассчитывается исходя из равенства линейных скоростей заготовки и ролика в точке контакта. Число оборотов шпинделя в минуту – 50 об/мин. Заглубление накатного ролика – 0,08 мм. Ось ролика расположена параллельно оси заготовки. Продольная подача не учитывалась. В процессе моделирования использование смазочно-охлаждающих жидкостей не предусматривалось. Коэффициент трения между накатным роликом и заготовкой принимался равным 0,4. Это значение является средним, если сравнивать с источниками [7, 8]. Было принято решение взять коэффициент меньше 0,5, так как в источнике [7] рассматривалось резание, где коэффициент будет больше за счет более химически активных вновь образующихся ювенильных поверхностей. Размер конечных элементов в сетке принят в диапазоне от 0,006 мм до 0,012 мм.

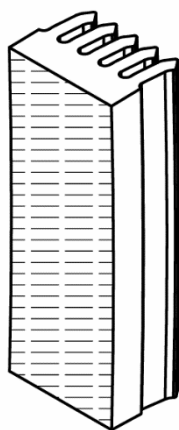


Рисунок 3 – Фиксация заготовки

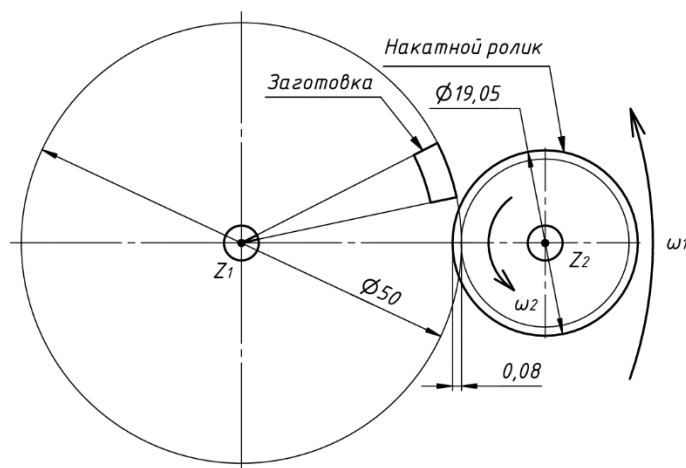


Рисунок 4 – Схема движения накатного ролика

В дальнейшем было произведено сравнение полученной геометрии микроструктурированной поверхности со шлифом по дну впадины, полученным в результате эксперимента [3].

3 Результаты исследований

В результате сравнения полученной расчетной геометрии и экспериментальных данных выявлено максимальное расхождение по геометрическим параметрам в 4 %. На рисунках 5, 6 и 7 показано сравнение полученной 3D модели с фотографиями. В табл. 1 представлены измеренные величины.

Таблица 1 – Сравнение полученных величин

Величина	Эксперимент, мкм	DEFORM-3D, мкм	Расхождение, %
Глубина впадины	134	134	0
Ширина ребра на высоте 67 мкм	72	75	+4
Шаг ребра	100	100	0

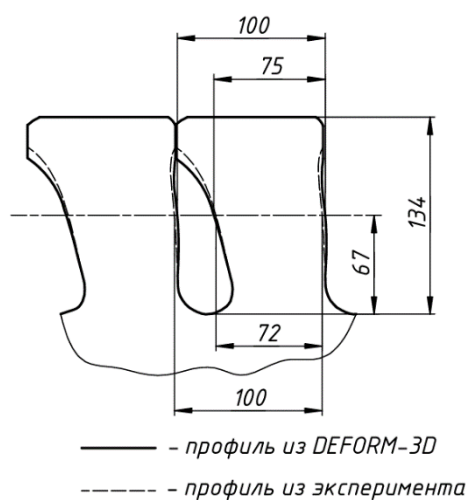
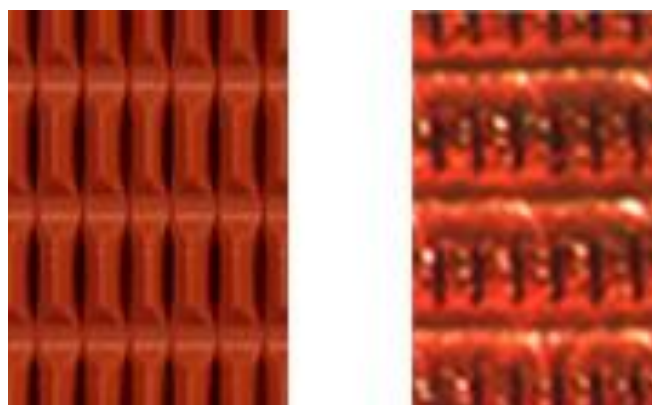
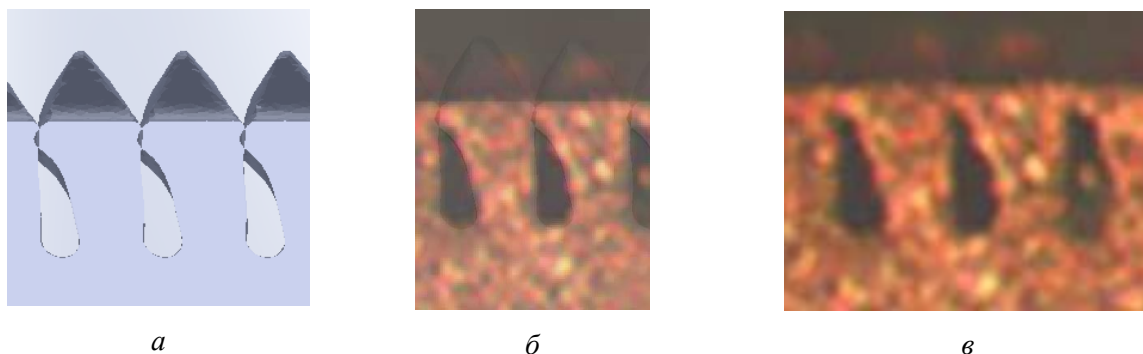


Рисунок 5 – сечение по дну впадины, сравнение профилей (схематично)



а
а – DEFORM-3D; б – фотография

Рисунок 6 – Вид, параллельный осевой плоскости



a – *DEFORM-3D*; *б* – наложение профиля из *DEFORM-3D* на фотографию; *в* – фотография
Рисунок 7 – Сечение по дну впадины, сравнение профилей по микрофотографии

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты показали, что использование программного комплекса *DEFORM-3D* позволяет корректно воспроизводить основные закономерности пластического течения материала и формирование микрогеометрии рельефа при заданных технологических параметрах обработки. Сопоставление расчётных данных с экспериментальными наблюдениями свидетельствует о качественном соответствии моделируемой и реальной геометрии поверхности, что подтверждает адекватность выбранной модели и корректность принятых допущений.

Таким образом, показано, что конечно-элементное моделирование в *DEFORM-3D* является эффективным и достоверным инструментом для анализа и прогнозирования процесса формирования микроструктурированных поверхностей кипения и может быть использовано на этапе инженерного проектирования теплообменных поверхностей без необходимости выполнения большого объёма трудоёмких экспериментальных исследований.

Список литературы

- 1 Аксянов, Р. А. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче и критическим тепловым потокам на микроструктурированных поверхностях при кипении различных жидкостей [Текст] / Р. А. Аксянов, Ю. С. Коханова, Е. С. Куимов, Р. А. Лэй, И. А. Попов // Тепловые процессы в технике. – 2020. – Т. 12, № 7. – С. 301–313. – DOI: 10.34759/tpt-2020-12-7-301-313.
- 2 И.А. Попов, А.В. Щелчков, Ю.Ф. Гортышов, Н.Н. Зубков. Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении на поверхностях с микрооребрением // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 4. – С. 537–546. DOI: 10.7868/S0040364417030206.
- 3 Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N. Heat Transfer and Crisis Phenomena at Boiling of Refrigerant Films Falling down the Surfaces Obtained by Deformational Cutting // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2018. – Vol. 25, No. 4–5. – P. 317–329. DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.2018025345
- 4 Das M.K., Moharana S., Laskar N., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer enhancement of different ribbing pitched semi-closed microstructure tube bundles fabricated by deformational cutting method // International Journal of Thermofluids. – 2024. – Vol. 22. – Art. 100695. DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100695
- 5 Astakhov V.P., Outeiro J.C. Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling // Machining: Fundamentals and Recent Advances / ed. by J. Paulo Davim. – London : Springer, 2008. — P. 1–40. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5
- 6 Битюцкая, Ю. Л. Получение штырьковых теплообменных структур повышенной теплогидравлической эффективности методом деформирующего резания : автореферат дис. кандидата технических наук : 05.02.07 / Битюцкая Юлия Леонидовна; Место защиты: ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). – Москва, 2019. – 16 с.

7 Зубков Н.Н., Цуканов Д.В., Бузаев Д.А., Битюцкая Ю.Л. САЕ-моделирование формирования оребренных структур, получаемых методом деформирующего резания // Воронежский научно-технический вестник. – 2022. – № 2(40). – С. 5–10.

8 Nuruzzaman D.M., Chowdhury M.A. Friction coefficient and wear rate of copper and aluminum sliding against mild steel // International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies. – 2013. – Vol. 4, No. 2. – P. 171–182.

References

1 Aksyanov, R. A. Generalization of experimental data on heat transfer and critical heat fluxes on microstructured surfaces during boiling of various liquids [Text] / R. A. Aksyanov, Yu. S. Kokhanova, E. S. Kuimov, R. A. Lei, I. A. Popov // Thermal Processes in Engineering. – 2020. – Vol. 12, No. 7. – P. 301–313. – DOI: 10.34759/tpt-2020-12-7-301-313.

2 I.A. Popov, A.V. Shchelchkov, Yu.F. Gortyshov, N.N. Zubkov. Intensification of heat transfer and critical heat fluxes during boiling on micro-finned surfaces // High Temperature. – 2017. – Vol. 55, No. 4. – P. 524–533. (Note: English translation page numbers may differ slightly from the original Russian) DOI: 10.1134/S0018151X17030164 (Note: DOI for the English version is provided, corresponding to the Russian DOI: 10.7868/S0040364417030206)

3 Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N. Heat Transfer and Crisis Phenomena at Boiling of Refrigerant Films Falling down the Surfaces Obtained by Deformational Cutting // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2018. – Vol. 25, No. 4–5. – P. 317–329. DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.2018025345

4 Das M.K., Moharana S., Laskar N., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer enhancement of different ribbing pitched semi-closed microstructure tube bundles fabricated by deformational cutting method // International Journal of Thermofluids. – 2024. – Vol. 22. – Art. 100695. DOI: 10.1016/j.ijft.2024.100695

5 Astakhov V.P., Outeiro J.C. Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling // Machining: Fundamentals and Recent Advances / ed. by J. Paulo Davim. – London : Springer, 2008. — P. 1–40. DOI: 10.1007/978-1-84800-213-5

6 Bityutskaya, Yu. L. Production of pin-type heat exchange structures of increased thermal-hydraulic efficiency by the deformational cutting method : abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences : 05.02.07 / Bityutskaya Yuliya Leonidovna; Defense place: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bauman Moscow State Technical University (National Research University)". — Moscow, 2019. — 16 p.

7 Zubkov N.N., Tsukanov D.V., Buzaev D.A., Bityutskaya Yu.L. CAE-modeling of the formation of finned structures obtained by the deformational cutting method // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2022. – No. 2(40). – P. 5-10.

8 Nuruzzaman D.M., Chowdhury M.A. Friction coefficient and wear rate of copper and aluminum sliding against mild steel // International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies. – 2013. – Vol. 4, No. 2. – P. 171–182.

© Каюшин Е. С., Зубков Н. Н., 2026