

На правах рукописи
УДК 621.9

Битюцкая Юлия Леонидовна

ПОЛУЧЕНИЕ ШТЫРЬКОВЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ СТРУКТУР
ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

Специальность:

05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ю.Л. Битюцкая -

Москва – 2019

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель: **Зубков Николай Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Петухов Юрий Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор кафедры инструментальной техники и технологии формообразования ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет «СТАНКИН»

Моргунов Юрий Алексеевич
кандидат технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроения ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский инструментальный институт "ВНИИИНСТРУМЕНТ" (ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»)

Защита состоится « ____ » _____ 20__ г. в _____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте bmstu.ru.

Телефон для справок: 8(499)267-09-63.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н, доцент



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности: поддержание устройств электронной аппаратуры в работоспособном состоянии и обеспечение их стабильной и бесперебойной работы требует надежных средств отвода избыточной теплоты, которая выделяется в процессе их работы. В этой области хорошо зарекомендовали себя системы жидкостного охлаждения (СЖО), для которых повышение эффективности является актуальной задачей. С целью интенсификации процесса теплопередачи в СЖО применяют теплообменники с развитыми поверхностями.

Увеличения площади теплообменной поверхности можно достичь применением развитых структур различной формы и размеров, получаемых литьем, механической обработкой, напрессовкой, сваркой, пайкой и т.д. Наиболее перспективными с точки зрения передачи высоких тепловых потоков считаются развитые не сборные поверхности штырькового типа. Большинство существующих методов получения штырьковых структур имеют значительные недостатки, основные из которых: невысокая производительность и ограниченные возможности по получению малых шагов расположения штырьков. Возможность уменьшения шага структуры при остальных неизменных геометрических параметрах, приводит к увеличению площади теплообменной поверхности, что является важным фактором повышения ее тепловой эффективности. Кроме вышеназванных недостатков, эффективность штырьковых структур, полученных методами сборки, снижена за счет наличия контактного теплового сопротивления в местах соединения штырьков с основанием.

В большинстве существующих конструкций теплообменников в СЖО используются фрезерованные развитые штырьковые структуры. При этом, минимальная величина зазора между штырьками составляет 200 мкм. Кроме того, изготовление одного штырькового водоблока на станке с ЧПУ требует более 60 минут основного времени.

Альтернативным методом получения теплообменных штырьковых поверхностей является метод деформирующего резания (ДР), который разрабатывался в работах Зубкова Н.Н., Овчинникова А.И., Васильева С.Г., Кононова О.В., Слепцова А.Д. Известно, что данный метод позволяет с высокой производительностью получать развитые поверхности штырькового типа с шагом на порядок меньше, чем при других методах, поскольку метод ДР не имеет принципиальных ограничений на величину зазора между штырьками. Другой особенностью структур, получаемых методом ДР, является уникальная форма штырьков, которая может способствовать турбулизации потока жидкости с увеличением коэффициента теплоотдачи.

Однако в настоящее время не раскрыты закономерности управления процессом ДР для получения штырьковых структур заданной формы и размеров. Не установлена взаимосвязь геометрических параметров структур с их эксплуатационными характеристиками. Нерешенность данных проблем не позволяет в полной мере использовать преимущества ДР для получения штырьковых по-

верхностей и теплообменных устройств на их основе с максимальной тепловой эффективностью и минимальным гидравлическим сопротивлением, что обуславливает актуальность проведения теоретических и экспериментальных исследований по совершенствованию метода ДР.

Цель и задачи работы: целью исследования является повышение эффективности систем жидкостного охлаждения электронных компонентов за счет управления параметрами штырьковых теплообменных структур, получаемых методом ДР.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи работы:

1. Раскрытие принципов управления формой получаемого единичного штырька на основе конечноэлементного моделирования процесса ДР в системе моделирования технологических процессов *Deform 3D*.
2. Выявление механизма взаимосвязей входных технологических параметров (геометрия режущо-деформирующего клина, режимы ДР, направление проходов) на геометрические параметры получаемых штырьковых структур.
3. Разработка и создание стенда для экспериментального определения зависимостей теплогидравлических характеристик штырьковых структур от их геометрических параметров.
4. Проведение теплогидравлических испытаний получаемых штырьковых структур, необходимых для выявления приоритетных параметров, влияющих в наибольшей степени на эксплуатационные характеристики теплообменника.
5. Разработка рекомендаций по выбору параметров штырьковых структур и режимов их получения для конкретных условий эксплуатации СЖО.
6. Апробация разработанных рекомендаций и устройств с теплообменными штырьковыми поверхностями, полученными методом ДР.

Научная новизна:

1. Разработана методология моделирования процесса ДР, которая на основе исходных геометрических параметров инструмента и режимов обработки позволяет получать достоверные трехмерные модели штырьковых структур.
2. Предложено сквозное компьютерное моделирование, которое позволяет установить взаимосвязь входных технологических параметров (геометрии инструмента и режимов обработки) получения штырьковых структур методом ДР с выходными теплогидравлическими характеристиками теплообменных устройств на их основе.
3. Установлено, что угол встречи и отношение глубины резания к подаче определяют форму штырьков, получаемых методом ДР, и их наклон. Аналитически получены и экспериментально подтверждены зависимости геометрических параметров штырьков от режимов их получения.

4. Установлены формы штырьков и тип штырьковых структур, обладающие наилучшей тепловой эффективностью и/или наименьшим гидравлическим сопротивлением

Практическая значимость:

1. Разработана методика назначения геометрических параметров инструмента и режимов обработки для получения штырьковых структур с заданными геометрическими характеристиками.
2. Разработаны и апробированы устройства с теплообменными поверхностями штырькового типа, обеспечивающие повышение эффективности охлаждения электронной аппаратуры. Разработан и запатентован способ получения микроштырьковых теплообменных поверхностей.
3. Даны рекомендации по практическому использованию метода ДР для получения штырьковых структур, в т.ч. для серийного производства.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конечноэлементное моделирование в системе *Deform 3D* на основе исходных технологических параметров обеспечивает получение достоверных трехмерных моделей единичных штырьков.
2. Наибольшее влияние на теплогидравлические характеристики штырьковых структур оказывает плотность расположения штырьков в структуре и высота структуры, при этом штырьки иглообразной формы обеспечивают повышенную тепловую эффективность, а винтообразные штырьки имеют минимальное гидравлическое сопротивление.
3. Предлагаемый алгоритм сквозного компьютерного моделирования позволяет установить взаимосвязь входных технологических параметров получения штырьковых структур методом ДР с выходными теплогидравлическими характеристиками теплообменных систем на их основе.

Методы исследования и достоверность полученных результатов: результаты экспериментальных исследований получены с использованием апробированных методик и современных аттестованных приборов. Показана воспроизводимость результатов. Выводы теоретических исследований согласуются с результатами экспериментов. Достоверность разработанных практических рекомендаций подтверждается внедрением в производство.

Реализация работы: результаты диссертационной работы использованы при выполнении гранта РФФИ проект №16-08-00489 «Исследование влияния параметров микроструктурирования поверхности на интенсификацию теплообмена и развитие кризисных явлений при пленочном течении смеси хладонов», НИР № 09/14-МТ «Разработка конструкции, технологии изготовления и изготовление опытного образца компактного теплообменника» и в учебном процессе кафедры «Инструментальная техника и технологии» в курсе «Спецглавы механической и физико-технической обработки».

Апробация работы: Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2015); IX Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016). Получен диплом за лучшую научную

работу по направлению «Машиностроительные технологии»; IV Международный семинар с элементами научной школы для молодых ученых «Проблемные вопросы теплообмена при фазовых превращениях и многофазных течениях в современных аппаратах химической технологии и энергетическом оборудовании» (Новосибирск, 2016); V Международный семинар с элементами научной школы для молодых ученых «Проблемные вопросы теплообмена при фазовых превращениях и многофазных течениях в современных аппаратах химической технологии и энергетическом оборудовании» (Новосибирск, 2016); XI Всероссийская инновационная молодежная научно-инженерная выставка «Политехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2016). Получен диплом II степени в номинации «Радиоэлектроника».

Личный вклад: проведен анализ проблем использования штырьковых структур в СЖО и технологий их получения. Разработан алгоритм выбора технологических параметров получения штырьковых структур по их эксплуатационным характеристикам. Произведено конечноэлементное моделирование процесса деформирующего резания в программном комплексе *Deform 3D*. Выполнены экспериментальные исследования по ДР, проведена обработка и интерпретация экспериментальных данных. Проведены теплогидравлические испытания для выявления приоритетных параметров штырьковых структур, влияющих в наибольшей степени на их эксплуатационные характеристики.

Публикации: основные положения диссертации опубликованы в 15 научных работах, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и 3 работы, индексируемые Scopus. Получен патент РФ на изобретение №2679815 «Способ получения развитой штырьковой теплообменной поверхности».

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 94 наименований и приложения. Диссертация содержит 133 страницы, 70 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования.

В Главе 1 приведен анализ областей рационального использования штырьковых структур в теплообменных устройствах и способы их получения.

В настоящее время выявлена тенденция использования штырьковых структур в системах конвективного жидкостного охлаждения вычислительных устройств как более эффективных по сравнению с ребренными. Это обусловлено как большей площадью их теплообменной поверхности, так и турбулизацией потока при его прохождении через массив штырьков, что повышает коэффициент теплоотдачи. Отмечается, что при максимально допустимых температурах процессора отводимая тепловая мощность штырьковыми структурами до 2-х раз выше, чем ребренными структурами.

Использование штырьковых структур в охлаждающих устройствах с фазовым переходом теплоносителя способствует интенсификации кипения и по-

вышению коэффициента теплоотдачи в 2-5 раз, как за счет увеличенной площади теплообменной поверхности, так и благодаря наличию в структуре множества граней и углов, которые служат дополнительными центрами парообразования. Микроштырьковые структуры также могут быть использованы в качестве поверхностей конденсации в системах кондиционирования, в холодильной технике и др. В отличие от ребер на острых вершинах и гранях штырьков растягивание пленки конденсата происходит в двух направлениях.

Традиционные методы получения штырьковых структур можно условно разделить на две группы: к первой группе относятся методы, включающие в технологический процесс сборку основания с теплосъемными элементами (или отдельные группы теплосъемных элементов между собой), ко второй группе относятся методы изготовления структуры из цельной заготовки. Фрезерование на станке с ЧПУ является одним из самых распространенных методов получения штырьковых структур. Этот метод является высокоуниверсальным с точки зрения получаемой формы штырька, однако он малопроизводителен. Изготовление одного водоблока со штырьковыми структурами по данному методу составляет более 60 минут основного времени.

Все существующие методы получения штырьковых структур имеют существенные ограничения по производительности или минимально-достигаемым геометрическим параметрам, что определяет их высокую стоимость и не обеспечивает высоких значений площади теплообменной поверхности структуры.

Многообразие существующих форм и размеров штырьковых структур обусловлено широким спектром требований, индивидуальных для каждой СЖО. Многочисленные исследования показывают, что универсальных для всех условий эксплуатации штырьковых структур не существует. Кроме того, изготовители исходят из технологичности изготовления структуры, при этом оптимальность ее характеристик для работы в конкретных условиях не достигается. Это связано с тем, что повышенная стоимость изготовления оптимальной структуры нецелесообразна с точки зрения соотношения затрат на ее изготовление и экономическими преимуществами от ее эксплуатации.

Альтернативным методом получения теплообменных развитых поверхностей, в том числе штырьковых структур, является метод деформирующего резания (ДР). Данный метод заключается в подрезании участка поверхностного слоя с его последующим отгибанием в сторону от исходного положения (Рис. 1, *а*). При этом отделения подрезаемого слоя от заготовки не происходит. Последовательная обработка плоскости инструментом для ДР с равными промежутками между каждым двойным ходом подачи инструмента образует на поверхности ряд ребер с шагом, равным шагу инструмента. Повторная обработка уже оребренной поверхности, но в отличном от первоначального направлении (глубина резания, подача и параметры инструмента повторной обработки также могут отличаться), приводит к формированию на поверхности множества упорядоченных штырьков, идеализированная форма которого показана на Рис. 1, *б*. Данный метод осуществим на пластичных материалах: медь, алюминий, титан,

стали и др. Высота и шаг получаемых структур может варьироваться от десятых долей до единиц миллиметров. Характерно то, что структуры, полученные по методу ДР не имеют принципиального ограничения на величину зазора между соседними ребрами или штырьками, что свидетельствует о возможности уменьшать шаг структуры до сотых

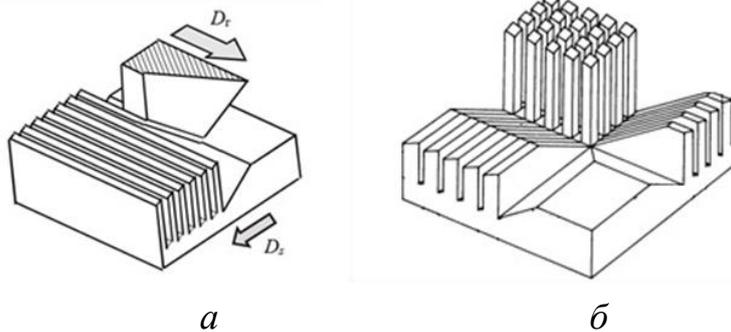


Рис. 1.

Принцип формирования развитого макрорельефа методом ДР: *а* – формирование ребер, *б* – формирование штырьков

долей миллиметра, таким образом охватывая весь известный диапазон рекомендованных геометрических параметров структур для конвективного охлаждения и охлаждения с фазовыми превращениями теплоносителя. Метод может быть реализован на стандартном металлорежущем оборудовании с производительностью на порядок превышающей производительность изготовления штырьковой структуры на фрезерном станке с ЧПУ.

Таким образом, возможности метода ДР по охватываемому диапазону геометрических параметров штырьковых структур позволяют сделать вывод о целесообразности их использования в системах конвективного охлаждения и системах охлаждения, основанных на фазовых переходах теплоносителя. Высокая производительность и технологичность изготовления теплообменных структур свидетельствует об их конкурентоспособности и перспективности.

Во главе 2 представлены аналитические исследования получения штырьковых структур, в том числе исследована форма штырька, рассчитана его длина и коэффициент увеличения площади штырьковой поверхности в зависимости от технологических параметров, произведено моделирование процесса ДР при формировании единичного штырька с использованием метода конечных элементов и предложен алгоритм сквозного компьютерного моделирования для выбора параметров ДР по заданным эксплуатационным характеристикам теплообменника.

В процессе деформирующего резания на втором проходе инструмента формируется штырек, который, деформируясь, может принимать различные формы: винтовую форму (Рис. 2, *а*), форму крючка (Рис. 2, *б*) или игольчатую форму (Рис. 2, *в*).

Определяющим фактором, определяющим форму получаемого штырька, является угол встречи θ – угол между направлениями первого и

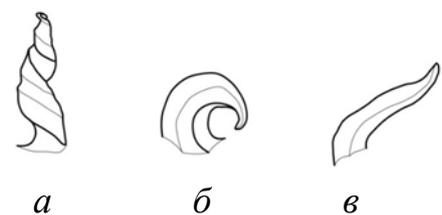


Рис. 2.

Варианты форм единичного штырька, полученного методом ДР: *а* – винтовой штырек; *б* – штырек в форме крючка; *в* – игольчатый штырек

второго проходов обработки. Штырьки игольчатой формы образуются при тупых углах встречи θ инструмента и ребра на втором проходе, как при входе в прирезцовую, так и в свободную сторону ребра. Штырьки винтовой формы формируются при острых углах встречи θ , когда инструмент врезается в прирезцовую сторону ребра, а при врезании в свободную сторону формируются штырьки в форме крючков.

В диссертации приведен вывод формулы для аналитического определения длины штырька $l_{ш}$ из равенства площадей сечения подрезаемого слоя и сечения штырька в плоскости перерезаемого ребра:

$$l_{ш} = \frac{t_2}{\sin\varphi_D} + \frac{S_2 \cdot \cos\varphi_D}{2 \cdot \sin\theta} - \frac{S_2 \cdot (1 - \sin\varphi_D)^2}{2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi_D}, \quad (1)$$

где t_2 – глубина резания второго прохода; θ – угол встречи; S_2 – величина подачи второго прохода; $\varphi_D = \arctg(tg\varphi \cdot \sin\theta)$ – угол подрезания (угол между линией пересечения плоскости резания с плоскостью перерезаемого ребра и проекцией вектора подачи на плоскость ребра).

Увеличение площади поверхности штырьковой структуры по сравнению с плоской исходной поверхностью определяется по формуле:

$$K_{ш} = 1 + \frac{2 \cdot t_1}{S_1 \cdot \sin\varphi_1} + \frac{2 \cdot t_2 \cdot \sin\varphi_1}{S_2 \cdot \sin\varphi_2}, \quad (2)$$

где φ_1, φ_2 – главный угол в плане инструмента первого и второго проходов обработки.

Теоретическое определение точных геометрических параметров получаемого единичного штырька затруднительно, в то время как трехмерная CAD-модель штырька необходима для моделирования тепломассообменных процессов штырьковых структур. В работе использована современная программа моделирования технологических процессов *Deform 3D* на основе метода конечных элементов (КЭ), позволяющая моделировать процессы формоизменения с большими степенями деформации. Использование программы *Deform 3D* позволило получать полноценную трехмерную модель единичного штырька в зависимости от параметров процесса ДР. Исходными данными для моделирования являлись трехмерные модели инструмента для ДР и заготовки, создаваемые в программе *Autodesk Inventor*, а также режимы ДР.

При моделировании инструмент принимался абсолютно жестким, а заготовка – жестко-пластичной со свойствами материала, задаваемого уравнением Джонсона-Кука. При моделировании использовалось локальное сгущение сетки, при этом минимальный размер КЭ составлял 0,05 мм, а размеры КЭ в остальной заготовке не превышали 0,25 мм. Для описания процессов резания использовалась модель сухого трения Кулона. Шаг перемещения инструмента задавался равным половине минимального размера КЭ.

Полученный в результате моделирования процесс формирования штырька представлен на Рис. 3, на котором отражено врезание инструмента (*a*), начало формирования штырька и изгибание вершины штырька о соседнее ребро (*b*) и формирование зазора между штырьками соседних ребер (*в*).

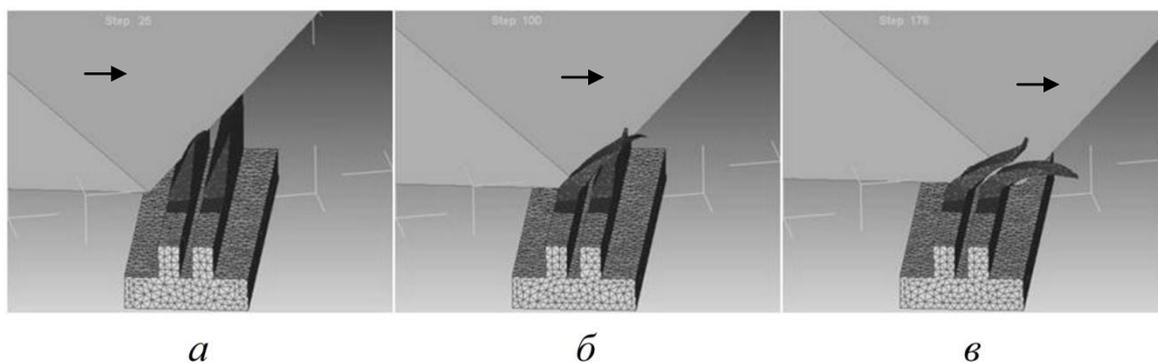


Рис. 3.

Процесс формирования единичного штырька

Форма полученного в результате моделирования методом КЭ штырька качественно и количественно соответствует форме штырька, полученного экспериментально при аналогичных режимах (Рис. 4).

Произведено сравнение площади поверхности штырьковой поверхности, рассчитанной аналитически по формуле (2) и измеренной на модели, полученной в результате CAE моделирования. Расхождение рассчитанной и измеренной величин составило 16%. В расчетную формулу была внесена корректировка, позволившая сократить расхождение до 4%.

Актуальной задачей является установление обратной связи между входными технологическими условиями формирования штырьковых структур методом ДР и результирующими эксплуатационными параметрами теплообменника. Для решения этой задачи предлагается использовать сквозное компьютерное моделирование. Предлагаемый подход позволяет выбирать режимные параметры ДР, обеспечивающие требуемые эксплуатационные характеристики теплоъемной пластины теплообменника. В качестве исходных данных используются технологические параметры процесса ДР и требуемые характеристики системы охлаждения. Выходными параметрами являются: температура охлаждаемого элемента и гидравлические потери, возникающие при прохождении теплоносителя через структуру.

Последовательность предлагаемого сквозного моделирования содержит 4 основные этапа: создание модели инструмента и заготовки (*Autodesk Inventor*); моделирование процесса формирования единичного штырька (*Deform 3D*); создание модели теплоъемной пластины с массивом штырьков и модели конструкции теплообменника (*Geomagic Studio, Autodesk Inventor*); моделирование работы теплоъемной пластины в составе СЖО (*SolidWorks Flow Simulation*).

В предлагаемом алгоритме предусмотрена корректировка исходных параметров в соответствии с полученными эксплуатационными характеристика-

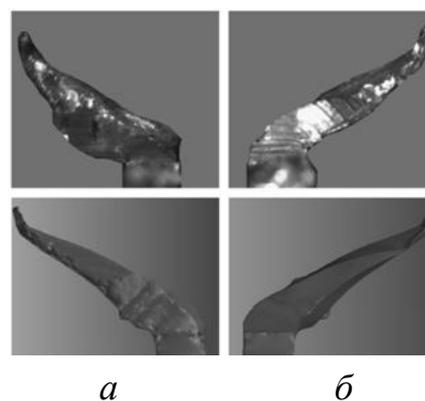


Рис. 4.

Штырек, полученный ДР (верхнее изображение), и его модель (нижнее изображение): а - *прирезцовая сторона*; б - *свободная сторона*

ми. В случае если результирующие параметры моделирования не обеспечивают необходимый тепловой режим охлаждаемого элемента, производится изменение технологических параметров получения структуры в соответствии со степенью их влияния на результирующие показатели эффективности СЖО. Этапы моделирования повторяются до тех пор, пока эксплуатационные требования не будут выполнены.

В Главе 3 исследовался характер и степень влияния наиболее существенных параметров процесса ДР посредством натурального моделирования формообразования штырьков с использованием металлической пластины, играющей роль единичного ребра, которое образуется после первого прохода обработки. В главе также приведено сравнение аналитических зависимостей, полученных в Главе 2 с экспериментальными данными. При перерезании пластины инструментом для ДР формируется ряд штырьков аналогичных тем, которые получают при перекрестном оребрении поверхности. Такое моделирование позволяет выявить влияние параметров второго прохода обработки на длину, вертикальность и форму штырьков, а также исключить из рассмотрения влияние несимметричности перерезаемого ребра и различие свойств его сторон. Штырьковая структуры с более вертикальными штырьками при той же площади теплообменной поверхности имеет меньшее гидравлическое сопротивление, поэтому вертикальность штырьков также представляет интерес для исследования. За параметр вертикальности ε в работе принималось отношение высоты штырьковой структуры к длине единичного штырька.

На Рис. 5, *а* видна согласованность расчетной и экспериментальной зависимостей длины штырька $l_{ш}$ от угла встречи θ . Схема определения угла встречи показана на Рис. 6. Согласно Рис. 5, *б* наиболее вертикальные штырьки формируются при угле встречи $\theta = 120 \div 140^\circ$ при $t = 2$ мм, $S = 2$ мм/дв.ход и при угле встречи $\theta = 100 \div 140^\circ$ при $t = 0,7$ мм, $S = 1,4$ мм/дв.ход.

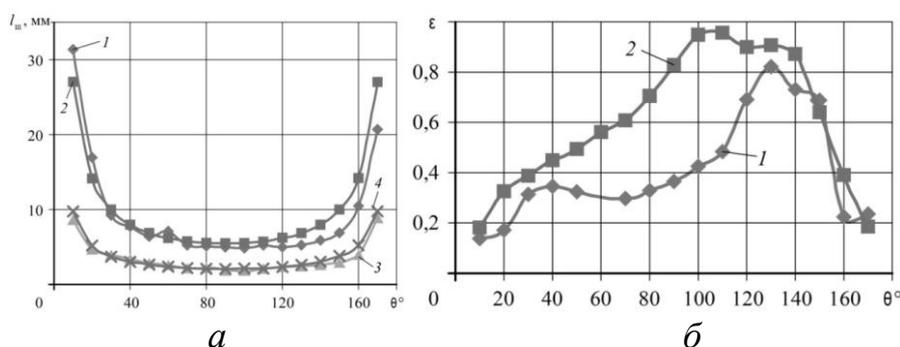


Рис. 5.

Результаты натурального моделирования: *а* - экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости длины $l_{ш}$ штырька от угла θ встречи при $t = 2$ мм, $S = 2$ мм/дв.ход (кривые 1 и 2) и $t = 0,7$ мм, $S = 1,4$ мм/дв.ход (кривые 3 и 4); *б* - зависимости вертикальности ε штырька от угла θ встречи при $t = 2$ мм, $S = 2$ мм/дв.ход (кривая 1) и $t = 0,7$ мм, $S = 1,4$ мм/дв.ход (кривая 2)

Было рассмотрено совместное влияние глубины t резания и подачи S на вертикальность штырьков. На Рис. 7 приведены экспериментальные данные по зависимости вертикальности ε и расчетного коэффициента увеличения площади поверхности структуры $K_{пл}$ от отношения t/S . Эксперименты проводили при постоянном угле встречи $\theta = 135^\circ$: при подаче $S = 1$ мм/дв.ход и 2 мм/дв.ход с перебором глубины резания и при глубине резания $t = 1,5$ мм и 3 мм с перебором подачи.

По результатам моделирования на пластине были сделаны следующие выводы: определяющее влияние на форму штырьков оказывает угол встречи θ , при этом вертикальность штырьков в наибольшей степени зависит от угла встречи θ и отношения t/S ; при изменении угла встречи наиболее вертикальные штырьки формируются в области от 100° до 140° ; уменьшение глубины резания по отношению к подаче t/S приводит к увеличению вертикальности штырьков, однако влечет за собой значительное снижение коэффициента увеличения площади поверхности.

В Главе 4 на созданном испытательном стенде исследовалось влияние параметров теплообменных штырьковых структур на их теплогидравлические характеристики.

Выбор оптимального сочетания параметров штырьковой структуры для конвективного жидкостного охлаждения осуществлялся путем проведения сравнительных испытаний образцов. Испытания проводились в условиях, приближенных к реальным условиям работы водоблока с постоянными техническими характеристиками СЖО и мощностью охлаждаемого элемента. В качестве основных оптимизируемых параметров были выбраны плотность расположения и вертикальность штырьков в структуре, а также форма штырьков. Нахождение оптимальных значений требуемых параметров осуществлялось за несколько серий испытаний в соответствии со следующим планом:

1. Определение структуры с оптимальной плотностью расположения штырьков;
2. Определение структуры с оптимальной формой штырьков (Рис. 8);

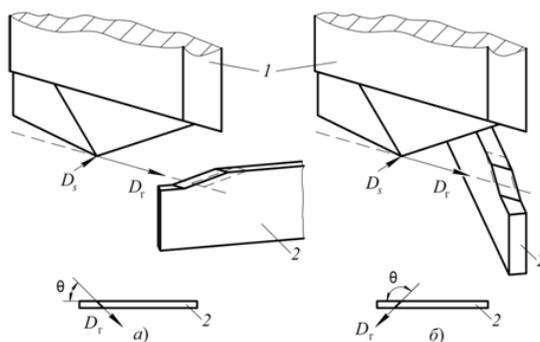


Рис. 6.

Схемы перерезания пластины с острым (а) и тупым (б) углами встречи θ : 1 – инструмент для ДР; 2 – модельная пластина

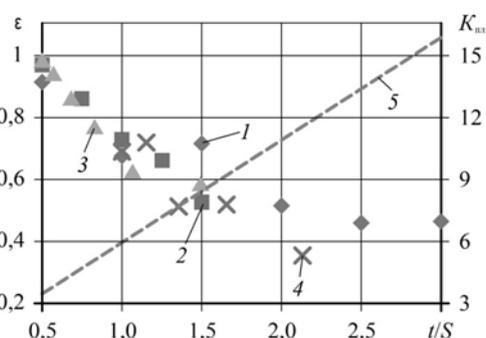


Рис. 7.

Зависимости вертикальности ε штырька (точки) и расчетного коэффициента $K_{пл}$ увеличения площади поверхности структуры (прямая 5) от t/S при $S = 1$ (точки 1) и 2 мм/дв.ход (точки 2) и $t = 1,5$ (точки 3) и 3 мм (точки 4)

3. Уточнение угла встречи для оптимальной формы штырьков;
4. Определение влияния вертикальности структуры;
5. Определение влияния направления течения теплоносителя.

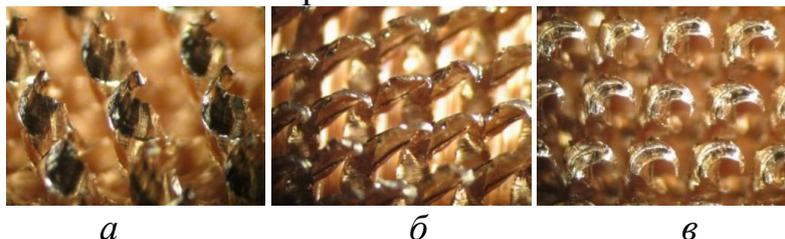


Рис. 8.

Варианты форм штырьков для испытаний: *a* – винтовые штырьки; *б* – штырьки игольчатой формы; *в* – штырьки в форме крючков

Схема стенда для имитации работы системы водяного охлаждения представлена на Рис.9, *a*, схема рабочего участка стенда показана на Рис.9, *б*. Испытываемый образец устанавливался в отверстие корпуса рабочего участка 1 и ориентировался относительно входного и выходного отверстий. Гладкая сторона образца прижималась к охлаждаемому элементу 2, в качестве которого использовался нагреватель мощностью 100 Вт. Через структуру образца насосом 3 пропускался поток воды.

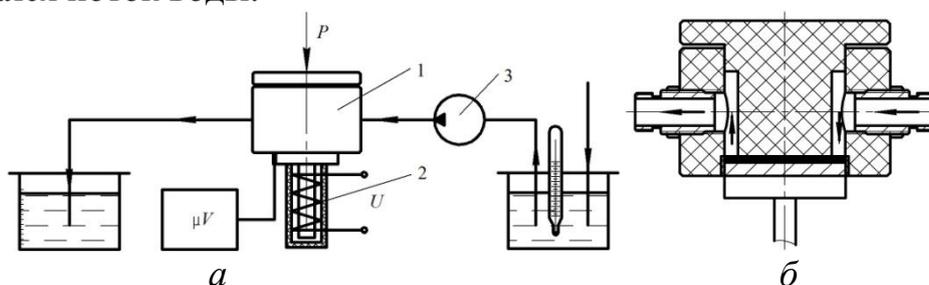


Рис.9.

Схема испытательного стенда (*a*) и рабочего участка (*б*)

В результате испытаний образцов, можно сделать следующие выводы:

1. Плотность расположения штырьков в структуре, обеспечивающая наименьшую температуру нагревателя, составила 71 шт/см². Наименьшее гидравлическое сопротивление наблюдается при плотности структуры в диапазоне 18-71 штырьков на кв. см.
2. Наилучшее охлаждение нагревателя обеспечивает структура с игольчатыми штырьками. Штырьки спиральной формы обеспечивают наименьшее гидравлическое сопротивление.
3. Выбор оптимальной плотности расположения штырьков в структуре имеет наибольшее значение, поскольку изменение этого параметра в исследованном диапазоне приводит к более значительным перепадам температуры нагревателя и изменению гидравлического сопротивления в сравнении с остальными рассмотренными параметрами.

В Главе 5 изложены технологические рекомендации по реализации метода ДР для получения штырьковых структур, предложены пути повышения производительности и эффективности метода, приведены примеры использования штырьковых структур в различных системах охлаждения, даны рекомендации

по организации серийного производства медных оснований водоблоков со штырьковыми структурами.

Получение штырьковых структур методом ДР, как правило, осуществляется на станках строгальной группы, координатно-расточных станках (КРС) и фрезерных станках с ЧПУ, использующих движение подачи стола как главное движение ДР. На станках с ЧПУ инструмент для ДР крепится непосредственно в шпиндель станка в цанге или в специальном приспособлении. При невозможности предотвратить проворот резца в шпинделе используется специальная переходная плита, в которой крепится инструмент для ДР, и которая закрепляется на корпус шпинделя станка.

Реализация метода осуществляется следующим образом: в результате первого прохода обработки на поверхности заготовки формируется оребренная структура (Рис.10, а). После этого заготовка разворачивается в поворотных тисках на требуемый угол и осуществляется второй проход ДР, результатом которого является формирование штырьковой структуры (Рис.10, б).

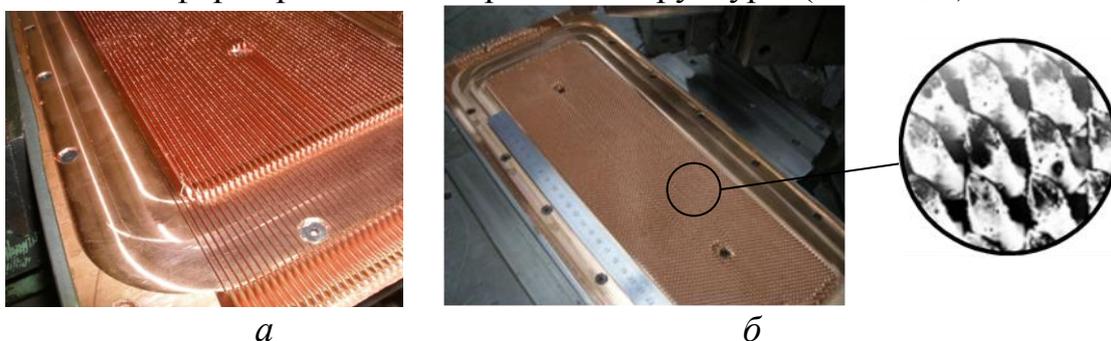


Рис.10.

Поверхность водоблока, обработанная на строгальном станке: а – оребренная после первого прохода; б – штырьковая структура после второго прохода

Размеры режущо-деформирующего клина могут варьироваться в некоторых диапазонах и выбираются в зависимости от ожидаемой высоты структуры. Геометрические параметры режущей части инструмента для получения штырьковых структур оптимизированы. В пересчете на стандартные углы для режущего инструмента: $\varphi = 27,6^\circ$; $\varphi' = 92,8^\circ$; $\alpha = 2,5^\circ$; $\alpha' = 3^\circ$; $\gamma = 58,3^\circ$; $\gamma' = -58,6^\circ$.

Твердые сплавы типа ВК8 по меди способны обеспечивать в 6...9 раз более высокую стойкость инструмента по сравнению с быстрорежущими сталями при обработке ДР и являются приоритетным вариантом инструментального материала. В случаях тяжелых условий работы режущо-деформирующего клина, когда существует опасность образования сколов на инструменте, предпочтение в выборе инструментального материала отдается быстрорежущим сталям, как более прочным.

Заменить множество двойных ходов инструмента для ДР, при котором он совершает рабочий и холостой ход при формировании каждого ребра, позволяет использование вращающегося однозубого инструмента с режущо-деформирующей вставкой. Инструмент вращается, при этом инструмент совершает поступательное движение аналогично обработке плоскости торцевой

фрезой. В результате первого прохода формируется оребренная поверхность с шагом расположения ребер, равным величине подачи на оборот инструмента или на зуб инструмента при многорезцовой обработке. Как и в случае строгания второй проход в несовпадающим с первым направлением формирует штырьковую поверхность. Время получения штырьковой поверхности условных размеров 60x60 мм составляет 1 минуту.

Поверхности кипения в охлаждающих устройствах должны иметь большое количество центров парообразования. При конденсации теплоносителей также важным является увеличение числа острых граней, растягивающих пленку конденсата и повышающих коэффициент теплоотдачи. На основе метода ДР был разработан новый способ получения микроштырьковых поверхностей с плотностью расположения, составляющей сотни штырьков на каждом квадратном миллиметре структуры (патент РФ №2679815 «Способ получения развитой штырьковой теплообменной поверхности»). Уменьшение шага на втором проходе при данной глубине резания возможно за счет формирования беззазорной оребренной структуры на первом проходе, т.е. формируют структуру с практически нулевым межреберным зазором. Нулевой межреберный зазор обеспечивается использованием инструмента с вспомогательным углом инструмента в плане φ_1 равным углу или немного меньшим (в пределах $1 \dots 5^\circ$) главного угла инструмента в плане φ . Направление второго прохода должно выпрямлять наклонные ребра, полученные на первом проходе, т.е. оно должно быть противоположно наклону ребер.

В результате установочных экспериментов были получены образцы (Рис. 11), имеющие заостренные, близкие к вертикальным штырьки высотой от десятых долей до единиц миллиметров с шагами в диапазоне от 0,05 до 0,5 мм. Штырьковая поверхность с шагами первого и второго проходов 0,05 мм имела плотность расположения 400 штырьков на каждом квадратном миллиметре теплообменной поверхности. Максимально полученное увеличение площади поверхности после обработки составило 48 раз.

Основными преимуществами структур, получаемых по разработанному методу, является существенное увеличение количества потенциальных центров парообразования и острых граней, растягивающих пленку конденсата, за счет высокой плотности расположения штырьков, а также значительное увеличение площади поверхности структуры за счет возможности увеличивать отношение глубины резания к подаче на обоих проходах. В настоящее время переданные образцы микроштырьковых поверхностей проходят испытания в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

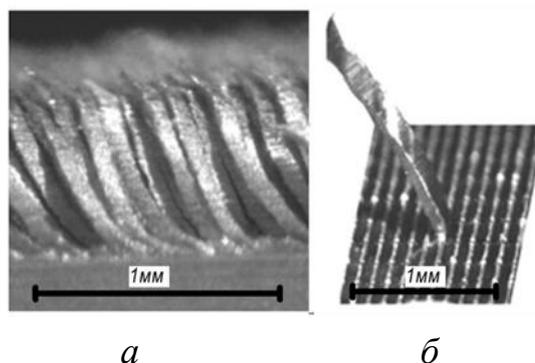


Рис. 11
 Фотография образца микроштырьковой поверхности: *а* - общий вид структуры; *б* - единственный штырек

В ООО «Профессиональные модификации» были переданы рекомендации по выбору параметров штырьковых структур, технологические рекомендации по получению штырьковых структур заданных геометрических параметров и твердотельные модели штырьковых структур для их последующего теплогидравлического расчета. Переданные материалы использовались для изготовления систем водяного охлаждения микропроцессорной техники по заказу ФГУП "НИИ "Квант", охлаждения суперкомпьютеров и охлаждения видеокарт.

С целью повышения мощности, подводимой к планарному магнетрону установки нанесения тонкопленочных покрытий по методу PVD *Blazers 350G* при сохранении качества рабочей среды в технологической камере, была осуществлена модернизация корпуса магнетрона, обеспечивающая его более эффективное охлаждение. На внутренней торцевой поверхности корпуса магнетрона из меди М1 изготавливалась штырьковая структура. В результате модернизации магнетронной распылительной системы было зафиксировано увеличение допускаемой подводимой мощности магнетрона в 2,5 – 3,4 раз.

Общие выводы

1. Проведенный литературный анализ позволяет утверждать, что штырьковые структуры, получаемые методом деформирующего резания, отвечают требованиям, предъявляемым к структурам, используемым в системах жидкостного охлаждения. Кроме того, метод обладает рядом преимуществ, основные из которых – это максимально достижимая площадь получаемой поверхности и высокая производительность метода.

2. Моделирование течения материала заготовки в процессе ДР методом КЭ позволяет получать достоверные модели единичных штырьков, при этом расхождение основных геометрических параметров по сравнению с экспериментальными данными не превышает 10%.

3. Предложена и экспериментально подтверждена аналитическая формула определения длины штырьков. Кроме того было установлено, что определяющее влияние на форму штырьков оказывает угол встречи: штырьки игольчатой формы образуются при тупых углах встречи инструмента и ребра на втором проходе, штырьки винтовой формы формируются при острых углах встречи, когда инструмент врежется в прирезцовую сторону ребра, а при врезании в свободную сторону формируются штырьки в форме крючков.

4. Разработан метод сквозного компьютерного моделирования, связывающий технологические параметры ДР и эксплуатационные характеристики штырьковых структур, что позволяет проектировать технологическую операцию получения теплообменной поверхности исходя из требуемых теплогидравлических характеристик системы жидкостного охлаждения.

5. Штырьки спиральной формы обеспечивают наименьшее гидравлическое сопротивление. Выбор оптимальной плотности расположения штырьков в структуре имеет наибольшее значение, поскольку изменение этого параметра приводит к более значительным перепадам температуры нагревателя и изменению гидравлического сопротивления в сравнении с остальными рассмотренными

ми параметрами. Теплогидравлические испытания показали, что наилучшее охлаждение обеспечивает структура с игольчатыми штырьками с плотностью расположения штырьков 71 шт/см².

6. Целесообразность и эффективность как самого метода ДР, так и штырьковых структур, получаемых на его основе, доказаны результатами его практического использования в системах жидкостного охлаждения электронной техники. Время на получение штырьковой структуры типового водоблока сокращено до 6 минут.

7. Разработан способ получения штырьковых структур с предельно плотным расположением штырьков. Разработанный способ защищен патентом РФ.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах из перечня ВАК РФ:

1. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л., Войнов С.А. Моделирование процесса формирования штырьков при деформирующем резании пластины // Вестник машиностроения. 2015 . № 11 . С. 18-21. (0,23 п.л. / 0,69 п.л.)

Версия: N. N. Zubkov, Yu. L. Bityutskaya, S. A. Voinov Shaping of Heat Exchanger Pins by Deformational Cutting // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36, No. 2. P. 81–85 (Scopus).

2. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Влияние параметров теплообменных штырьковых структур на их эксплуатационные характеристики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2017. №2 (113). С. 108-120. (0,69 п.л. / 1,38 п.л.).

3. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Моделирование процесса деформирующего резания и геометрических параметров штырьковых структур для анализа теплогидравлических характеристик теплосъемных пластин // Технология металлов. 2017. №10. С.31-37. (0,47 п.л. / 0,94 п.л.).

Версия: N. N. Zubkov, Yu. L. Bityutskaya. Simulation of the Deformational Cutting and the Geometric Parameters of Pin Structures to Analyze the Thermohydraulic Characteristics of Heat-Removal Plates // Russian Metallurgy (Metally). 2018. Vol. 2018, №13. P. 16–21 (Scopus, Web of Science).

Патент:

4. Патент на изобретение № 2679815. РФ. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Способ получения развитой штырьковой теплообменной поверхности. Заявлено 28.12.2017. Заявка: 2017146802. Опубликовано 13.02.2019. Бюл. № 5.

В других изданиях:

5. Heat transfer at boiling of R114/R21 refrigerants mixture film on microstructured surfaces / O.A. Volodin, N.I. Pecherkin, A.N. Pavlenko, N.N. Zubkov, Y.L. Bityutskaya // Journal of Physics: Conference Series. T.891. 2017. 8pp. (Scopus). (0,1 п.л. / 0,5 п.л.).

6. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Получение штырькового макрорельефа подрезанием поверхностных слоев // Материалы V международной научно-

практической конференции «Фундаментальная наука и технологии - перспективные разработки». 2015. NorthCharleston, SC, USA. С. 162. (0,06 п.л. / 0,13 п.л.)

7. Войнов С. А., Битюцкая Ю. Л., Зубков Н. Н. Особенности формирования развитых теплообменных структур для жидкостного охлаждения электронных компонентов // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии». (0,04 п.л. / 0,13 п.л.).

8. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Исследование теплообменных характеристик штырьковых структур // Proceedings of materials the international scientific conference MKO-2015-05 «News of science», 30-31 августа 2015. С. 54-59. (0,16 п.л. / 0,31 п.л.).

9. N.N. Zubkov, Yu. L. Bityutskaya Novel surface structures for the phase transition // Тезисы международного семинара ISHM IV, Новосибирск, 18-19 апреля 2016 г. С. 14. (0,03 п.л. / 0,06 п.л.).

10. Heat transfer at film flow of binary mixture of freons on surface with microrelief / O.A. Volodin, N.I. Pecherkin, A.N. Pavlenko, N.N. Zubkov, Y.L. Bityutskaya // Тезисы международного семинара ISHM V, Новосибирск, 16-17 ноября 2016 г. С. 83. (0,01 п.л. / 0,06 п.л.).

11. Битюцкая Ю.Л., Зубков Н.Н. Моделирование процесса деформирующего резания для формирования теплообменных штырьковых структур // Сборник докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Москва, 5-8 октября 2016 г. С. 35-38. (0,16 п.л. / 0,31 п.л.).

12. Теплообмен при кипении в условиях пленочного течения бинарной смеси хладонов по поверхности с микроструктурой / Володин О.А., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. // Инновационная наука. 2016. №12-4. С. 8-15. (0,1 п.л. / 0,5 п.л.).

13. Теплообмен при кипении пленки смеси хладонов R114/R21 на микроструктурированных поверхностях / Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. // Материалы конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, 9-11 октября 2017г. С. 48-50. (0,04 п.л. / 0,19 п.л.).

14. Кипение стекающей пленки жидкости на вертикальном цилиндре с микроструктурой / Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. // Материалы Всероссийской конференции «XXXIII сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 06-08 июня 2017г. С. 282. (0,01 п.л. / 0,06 п.л.).

15. Влияние типа структурированной поверхности на теплоотдачу при испарении и кипении стекающих пленок / Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 5. № 1. С. 157-162. (0,08 п.л. / 0,38 п.л.).