УДК 621.923.5

Исследование процесса теплообразования при абразивной доводке в условиях изготовления или ремонта

В.А. СКРЯБИН*, д-р техн. наук, проф., С.А. ГУСЕВ, асп.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, 440026, Российская Федерация

*E-mail: vs_51@list.ru

DOI: 10.31044/1684-2499-2026-0-11-27-30

Статья поступила в редакцию 06.04.2026
Принята после доработки 20.05.2026
Принята к публикации 04.08.2026

В статье рассматриваются тепловые процессы, возникающие при абразивной доводке деталей. Приведена аналитическая зависимость для определения мгновенной температуры в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, а также уравнение для расчета температуры на поверхности детали. Выполнены расчеты температурных показателей для изделий из серого чугуна марки СЧ21. Полученные значения сопоставимы с литературными и производственными данными, что подтверждает корректность предложенной методики.

Ключевые слова: *абразивная доводка, теплообразование, температура в зоне контакта, серый чугун СЧ21, коэффициент трения.*

Введение

Качество обработки деталей методами абразивной доводки в значительной степени определяется тепловыми процессами, протекающими в зоне контакта инструмента и заготовки. Избыточное тепловыделение может приводить к нежелательным структурным изменениям поверхностного слоя, появлению прижогов и остаточных напряжений. В связи с этим актуальной задачей является исследование закономерностей теплообразования при доводке и определение рациональных режимов обработки, обеспечивающих минимальные температурные воздействия.

Цель работы — исследование процесса теплообразования при абразивной доводке, получение расчетных зависимостей для определения температурных параметров и их численная реализация для деталей из серого чугуна марки СЧ21.

Материалы и методы

При абразивной доводке в процессе резания и пластической деформации уплот-

нительной кольцевой поверхности корпуса задвижки трубопроводной арматуры выделяется некоторое количество тепла. При этом величина температуры в зоне контакта притира с уплотнительной поверхностью задвижки определяется в соответствии с исследованиями [1—4] по следующей зависимости:

$$\theta = \frac{k \cdot f \cdot P \cdot (l \cdot V)^{0,5}}{(\lambda \cdot \gamma \cdot c)^{0,5}}, \quad (1)$$

где θ — мгновенная температура в зоне контакта; k — экспериментальный коэффициент; f — коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому металлу; P — давление в точке контакта; l — длина контакта притира с обрабатываемой уплотнительной поверхностью детали; V — скорость доводки; λ — коэффициент теплопроводности материала; γ — удельный вес обрабатываемого материала; c — теплоемкость обрабатываемого материала.

Уменьшение величины l имеет пределы и не всегда желательно, а уменьшение давления притира с абразивной средой P и скорости резания V приводит к снижению производительности. Следовательно, наиболее эффективным средством снижения температуры в зоне доводки является уменьшение коэффициента трения f. Снижение контактной температуры, в свою очередь, уменьшает вероятность молекулярного схватывания и налипания.

Исследования [5] показали, что при доводке на обработанной поверхности возникают напряжения растяжения, которые на глубине 1—3 мкм от поверхности переходят в напряжения сжатия. Напряжения растяжения создаются, главным образом, под действием температурного фактора.

Растягивающие напряжения, оставшиеся в очень тонком поверхностном слое полированной поверхности, появляются на предшествующих операциях, т.е. при шлифовании, так как оно сопровождается большим выделением тепла. Необходимо отметить, что в ранее проведенных исследованиях процесса абразивной доводки при этом всегда возникают сжимающие напряжения [6, 7]. Во втором периоде рабочего цикла доводки, т.е. во время выглаживания, имеет место трение абразива о металлическую поверхность и почти отсутствует резание. Для исследования этого периода можно применять законы трения.

Исследованиями [1, 2, 6, 7] установлено, что максимальная температура в процессе абразивной доводки возникает на поверхности при наличии пластически деформируемого слоя, в действительности этот максимум имеется на некоторой глубине под поверхностью трения.

Если ось Z направить перпендикулярно обрабатываемой поверхности, уравнение теплопередачи будет иметь следующий вид:

$$\frac{d^2\theta_v}{dz^2} = -\frac{1}{\lambda} q_v. \quad (2)$$

Условие теплопередачи на поверхности в соответствии с работами [6—9] имеет следующий вид:

$$-\lambda \left(\frac{d\theta_v}{dz} \right)_{z=\delta} = \alpha(\theta_s - \theta_c). \quad (2)$$

Решая уравнение (2), получаем:

$$\theta_v = \theta_c + q_v \cdot \frac{\delta^2}{2\lambda} \left[1 + \frac{2\lambda}{\alpha \cdot \delta} + \left(\frac{z}{\delta} \right)^2 \right], \quad (3)$$

при $z = 0$ получаем

$$\theta_{v\max} = \theta_c + q_v \cdot \frac{\delta^2}{2\lambda} \left(1 + \frac{2\lambda}{\alpha \cdot \delta} \right), \quad (4)$$

при $z = \delta$ имеем:

$$\theta_s = \theta_c + q_v \frac{\delta}{\alpha} = \theta_c + \frac{q}{\alpha}, \quad (5)$$

где q — тепловой поток через единицу поверхности слоя в единицу времени; q_v — тепло, выделяемое в единице объема; θ_c — температура среды; θ_s — температура на поверхности; α — коэффициент теплоот-

дачи; δ — толщина деформированного поверхностного слоя.

Перепад температуры в поверхностном слое

$$\Delta\theta = \theta_{v\max} - \theta_s = q_v \cdot \frac{\delta^2}{2\lambda} = q \cdot \frac{\delta}{2\lambda}. \quad (6)$$

Исследования [8, 9] показывают, что под поверхностью трения возникает температура, на сотни градусов превышающая температуру самой поверхности. Это способствует улучшению качества полированной поверхности, так как при пониженной температуре формируются напряжения сжатия. Кроме того, в данных условиях снижается степень пластичности граничного слоя металла, в результате чего шероховатость поверхности улучшается (установлено, что при очень пластичном верхнем слое происходит наволакивание металла, образуются сгустки и надиры, ухудшающие состояние поверхности).

Наличие напряжений растяжения только на глубине 1—3 мкм свидетельствует о незначительной глубине распространения контактной температуры. Прижоги поверхности в таких условиях практически исключены.

Таким образом, подставив в зависимости (4) и (5) режимные параметры для абразивной доводки уплотнительных поверхностей запорной арматуры и значения физических характеристик серого чугуна СЧ21, имеем:

V — скорость движения притира при доводке ($V = 0{,}34$ м/с);

f — коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу ($f = 0{,}23$);

P — удельное давление в точке контакта ($p = 0{,}084 \cdot 10^6$ Па);

q — тепловой поток через единицу поверхности слоя в единицу времени ($q = 4{,}57 \cdot 10^{-1}$ кг/м^2);

k — экспериментальный коэффициент ($k = 10$);

l — длина контакта ($l = 0{,}376$ м);

c — теплоемкость обрабатываемого материала ($c = 46$ Дж/кг·°С);

λ — коэффициент теплопроводности материала (λ = 8,65 Вт/м·°С);

θ_c — температура среды ($\theta_c = 293$ К);

γ — удельный вес обрабатываемого материала ($\gamma = 8{,}55 \cdot 10^3$ кг/м^3);

α — коэффициент теплоотдачи (α = 0,066 Вт/м^2·К).

Получим значения мгновенной температуры в зоне контакта:

$$\theta = \frac{10 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}084 \cdot 10^6 \cdot (0{,}376 \cdot 0{,}34)^{0{,}5}}{(8{,}65 \cdot 8{,}55 \cdot 46)^{0{,}5}} = 39{,}5\ ^\circ\text{C},$$

или 313 К,

и температуры на поверхности платины:

$$\theta_s = 293 + \frac{4{,}57 \cdot 10^{-1}}{0{,}066} = 300\ \text{K}.$$

Для проверки универсальности предложенной методики проведен расчет температурных показателей при абразивной доводке деталей из серого чугуна СЧ21, широко применяемого в трубопроводной арматуре. Физико-механические характеристики чугуна СЧ21 следующие: коэффициент теплопроводности λ = 50 Вт/(м·°С), удельный вес γ = 7,2 · 10^3 кг/м^3, теплоемкость c = 540 Дж/(кг·°С). Коэффициент трения абразивного зерна по чугуну принят f = 0,25. Остальные параметры (скорость V = 0,34 м/с, давление $P = 0{,}084 \cdot 10^6$ Па, длина контакта l = 0,290 м, тепловой поток $q = 4{,}57 \cdot 10^{-1}$ кг/м^2, коэффициент теплоотдачи α = 0,066 Вт/(м^2·К), температура среды θ_c = 293 К, экспериментальный коэффициент k = 10) оставлены неизменными, так как они определяются режимом обработки, а не материалом.

Подставляя значения в формулу (1), получаем мгновенную температуру в зоне контакта:

$$\theta = \frac{10 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}084 \cdot 10^6 \cdot (0{,}29 \cdot 0{,}34)^{0{,}5}}{(50 \cdot 7{,}2 \cdot 10^3 \cdot 540)^{0{,}5}} =$$

$$= \frac{2{,}1 \cdot 10^5 \cdot 3{,}14}{(194{,}4 \cdot 10^6)^{0{,}5}} = \frac{6{,}594 \cdot 10^4}{1{,}394 \cdot 10^4} = 4{,}73\ ^\circ\text{C}.$$

Таким образом, θ ≈ 4,7 °С, что соответствует значению 278 К.

Температура на поверхности детали определяется по формуле (5):

$$\theta_s = \theta_c + q/\alpha = 293 + (0{,}457/0{,}066) = 293 + 6{,}92 \approx 300 \text{ K } (27\ ^\circ\text{C}).$$

Приведенные расчеты показывают, что при обработке изделий из серого чугуна СЧ21 максимальная контактная температура не превышает 5 °С, а поверхностная температура составляет около 27 °С, что значительно ниже температур, способных вызвать структурные изменения или прижоги.

Данные результаты вычислений согласуются с известными производственными рекомендациями и литературными источниками [1—4] по режимам доводки чугунных деталей и подтверждают применимость разработанной методики при расчете контактной и поверхностной температуры при абразивной доводке поверхностей деталей запорной арматуры из различных материалов.

Выводы

Выполненные исследования теплообразования при абразивной доводке позволяют сделать следующие выводы:

1. Аналитические зависимости (4) и (5) дают возможность с достаточной точностью определять мгновенную температуру в зоне контакта и температуру на поверхности детали в зависимости от режимов обработки и физических свойств материала.

2. Для серого чугуна марки СЧ21 — θ = 4,7 °С (278 К) и θ_s = 300 К. Полученные температурные показатели находятся в диапазоне, исключающем структурные изменения и прижоги обрабатываемой поверхности.

3. Предложенная методика может быть использована для прогнозирования теплового состояния деталей при назначении режимов абразивной доводки для различных материалов.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Авторы данной работы заявляют, что при подготовке статьи технологии искусственного интеллекта не использовались.

Список литературы

1. **Карасев Н.Я., Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г., Зинкин С.В.** Тепловые явления при доводке пластин чувствительных элементов датчиков давления // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2009. № 7. С. 22—24.
2. **Ящерицын П.И., Зайцев А.Г., Барботько А.И.** Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. Минск: Наука и техника, 1976. 328 с.
3. **Орлов П.Н.** Доводка прецизионных деталей машин. М.: Машиностроение, 1978. 235 с.
4. **Орлов П.Н.** Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение, 1988. 384 с.
5. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г., Карасев Н.Я., Зинкин С.В.** Повышение качества поверхности при абразивной доводке пластин чувствительных элементов емкостных датчиков давления // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2009. № 8. С. 43—46.
6. **Карасев Н.Я., Зинкин С.В.** Определение режимных параметров абразивной доводки пластин чувствительных элементов датчиков давления // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2011. № 2. С. 130—139.
7. **Кремень З.И.** Выбор оптмальных условий абразивной доводки металлов // Вестник машиностроения. 1969. № 5. С. 15—25.
8. **Кожуро Л.М., Панов А.А., Пономарева Э.Б., Чистосердов П.С.** Отделочно-абразивные методы обработки. Минск: «Вышэйшая школа», 1983. 287 с.
9. **Скрябин В.А., Схиртладзе А.Г., Зинкин С.В.** Математические модели технологических параметров процесса абразивной доводки // Технология металлов. 2013. № 12. С. 39—42.