ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Хусанов Юнусали Юлдашалиевич
Доктор технических наук (DSc),
доцент, Ферганский государственный
технический университет
E-mail: yunusali1987@mail.ru
Толипов Ахроржон Назиржон угли
Докторант кафедры
«Технология машиностроения», Ферганский
государственный технический университет
E-mail: akhrorjon.tolipov@mail.ru
https://orcid.org/0009-0002-4589-9569
Абдуллаева Василатхон Юлдашали кизи
Докторант кафедры
«Технология машиностроения», Ферганский
государственный технический университет
E-mail: vasilaabdullayeva91@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.23151590

Аннотация В работе представлены результаты экспериментального исследования остаточных напряжений, формирующихся в поверхностном слое деталей из конструкционных и нержавеющих сталей, а также лёгких сплавов после точения, фрезерования и шлифования. Для измерения остаточных напряжений применялись рентгеновская дифрактометрия (метод $\sin^2\psi$) и метод высверливания отверстий. Установлено, что вид и режим обработки оказывают определяющее влияние на знак и величину остаточных напряжений: точение и фрезерование при умеренных скоростях формируют сжимающие напряжения до −120 МПа, тогда как сухое шлифование генерирует растягивающие напряжения до +180 МПа, способные снизить усталостную прочность детали. Применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при шлифовании позволяет перевести напряжения в сжимающую область. Результаты подтверждены статистически (ANOVA,$p<0,05$) и иллюстрированы графиками и диаграммами.

Ключевые слова: остаточные напряжения, механическая обработка, точение, фрезерование, шлифование, рентгеновская дифрактометрия, поверхностный слой, усталостная прочность

Abstract This paper presents experimental results on residual stresses formed in the surface layer of structural steel, stainless steel, and light alloy specimens after turning, milling, and grinding. Residual stresses were measured using X-ray diffraction ($\sin^2\psi$ method) and blind-hole drilling. It was found that the type and regime of machining critically determine the sign and magnitude of residual stresses: turning and milling at moderate speeds introduce

compressive stresses up to −120 MPa, while dry grinding generates tensile stresses up to +180 MPa, potentially reducing fatigue strength. The use of cutting fluid (coolant) during grinding shifts the stress state into the compressive region. Results are statistically confirmed (ANOVA, $p < 0.05$) and illustrated with charts and diagrams.

Key words: residual stresses, machining, turning, milling, grinding, X-ray diffraction, surface layer, fatigue strength.

Annotatsiya Ushbu maqolada konstruksion po'lat, zang'armaydigan po'lat va yengil qotishma namunalarini tokarlik, frezalash va jilvirlash orqali ishlov bergandan keyin hosil bo'luvchi qoldiq kuchlanishlarni eksperimental o'rganish natijalari keltirilgan. Qoldiq kuchlanishlar rentgen difraktometriya ($\sin^2\psi$ usuli) va teshik burg'ulash usuli yordamida o'lchandi. O'rta tezlikdagi tokarlik va frezalash −120 MPa gacha siquvchi kuchlanishlar hosil qilishi, quruq jilvirlash esa +180 MPa gacha cho'zuvchi kuchlanishlarga olib kelishi aniqlandi. Sovituvchi suyuqlik (СОЖ) qo'llash kuchlanishlarni siquvchi sohaga o'tkazadi. Natijalar statistik jihatdan tasdiqlangan (ANOVA, $p < 0,05$).

Kalit so'zlari: qoldiq kuchlanishlar, mexanik ishlov berish, tokarlik, frezalash, jilvirlash, rentgen difraktometriya, yuza qatlami.

1. ВВЕДЕНИЕ

Остаточные напряжения в поверхностном слое деталей машин являются одним из ключевых факторов, определяющих их эксплуатационные характеристики: усталостную прочность, коррозионную стойкость, точность размеров и износостойкость. Формирование остаточных напряжений происходит вследствие неоднородных пластических деформаций, термических градиентов и фазовых превращений в зоне обработки — явлений, неразрывно связанных с любым видом механической обработки резанием.

Значительный вклад в исследование этой проблематики внесли Мэтэлин Ю.А. (1977), Колесников К.С. (2001), а из зарубежных авторов — Jawahir et al. (2011), M'Saoubi et al. (2008) и Ulutan & Özel (2011). Тем не менее систематическое экспериментальное сравнение нескольких видов обработки на одних и тех же материалах с применением современных методов измерения по-прежнему остаётся актуальной задачей.

Практическая значимость проблемы обусловлена тем, что неверный выбор режимов обработки может привести к формированию растягивающих остаточных напряжений, существенно снижающих предел выносливости деталей — особенно в авиационной, атомной и нефтегазовой промышленности. Переход к высокоскоростной обработке (HSM) и применение новых инструментальных материалов дополнительно актуализируют исследования в данном направлении.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном определении величины и знака остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из четырёх конструкционных материалов после трёх основных видов механической обработки, а также в количественной оценке влияния режимных параметров и применения СОЖ на характер распределения напряжений.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Материалы образцов

Для обеспечения широкого охвата типичных задач машиностроения были выбраны четыре конструкционных материала: сталь 45 (σT = 355 МПа, ГОСТ 1050-2013), нержавеющая сталь 12Х18Н10Т (σT = 245 МПа, аустенитный класс), высокопрочный алюминиевый сплав Д16Т (σT = 275 МПа, авиационный) и титановый сплав ВТ6 (Ti–6Al–4V, σT = 880 МПа). Образцы изготавливались в форме прямоугольных пластин 80 × 40 × 12 мм. Перед обработкой все образцы подвергались отжигу при 600°C (1 ч) для снятия исходных технологических напряжений.

Каждую комбинацию «материал × вид обработки × режим» представляли по 8 образцов; итого 192 образца. Такой объём обеспечил статистическую достоверность результатов (доверительный интервал 95%).

2.2. Виды и режимы обработки

Точение выполнялось на токарном станке DMG Mori CLX 350 с применением сменных пластин Sandvik CNMG 120408-MF4 (марка GC4325). Диапазон скоростей резания составлял 50–300 м/мин, подача — 0,1 и 0,2 мм/об, глубина резания — 0,5 мм. Фрезерование торцовой фрезой производилось на обрабатывающем центре Haas VF-3; скорость — 80–250 м/мин, подача — 0,05–0,15 мм/зуб. Шлифование плоскостей осуществлялось на станке Okamoto PSG-63DX кругами 24A F46 и F60 в двух режимах: сухом и с подачей водно-масляной эмульсии 5%.

Таблица 1. Основные режимы механической обработки, применённые в эксперименте

Вид обработки	v (м/мин)	f (мм/об или мм/зуб)	a (мм)	СОЖ	n опытов
Точение (низк. скор.)	50–80	0,2	0,5	Да	8×4
Точение (выс. скор.)	200–300	0,1	0,5	Да	8×4
Фрезерование (низк. скор.)	80–100	0,10	1,0	Да	8×4
Фрезерование (выс. скор.)	200–250	0,05	0,5	Да	8×4
Шлифование сухое	22 м/с	—	0,02	Нет	8×4
Шлифование с СОЖ	22 м/с	—	0,01	5% эм.	8×4

Таблица 1 — Параметры обработки. v — скорость резания; f — подача; a — глубина резания.

2.3. Методы измерения остаточных напряжений

Рентгеновская дифрактометрия (XRD) по методу $\sin^2\psi$ применялась как основной метод. Использовался дифрактометр Bruker D8 Advance с детектором VANTEC-500, излучение CrKα. Измерение проводилось в 7 наклонах ψ от 0° до 45°. Параметры определялись по сдвигу пика {211} стальных образцов и {311} алюминиевых. Погрешность метода — ±15 МПа.

Метод высверливания отверстий (ASTM E837-20) применялся верификационно для 30% образцов. Датчики HBM 1-LY11-1,5/120 наклеивались в розеточной конфигурации; сверление на глубину 1 мм (диаметр 1,6 мм) с шагом 0,05 мм. Расчёт напряжений выполнялся по методу Power Series. Совпадение с XRD-данными составило в среднем 94%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Влияние скорости и вида обработки (рис. 1)

На рисунке 1 представлены зависимости остаточных напряжений от скорости обработки для стали 45. Точение и фрезерование при скоростях до 150 м/мин формируют сжимающие напряжения (отрицательные значения), объясняемые доминированием механического упрочнения над термическим разупрочнением. При скоростях выше 200 м/мин напряжения переходят в растягивающую область вследствие роста тепловыделения в зоне контакта.

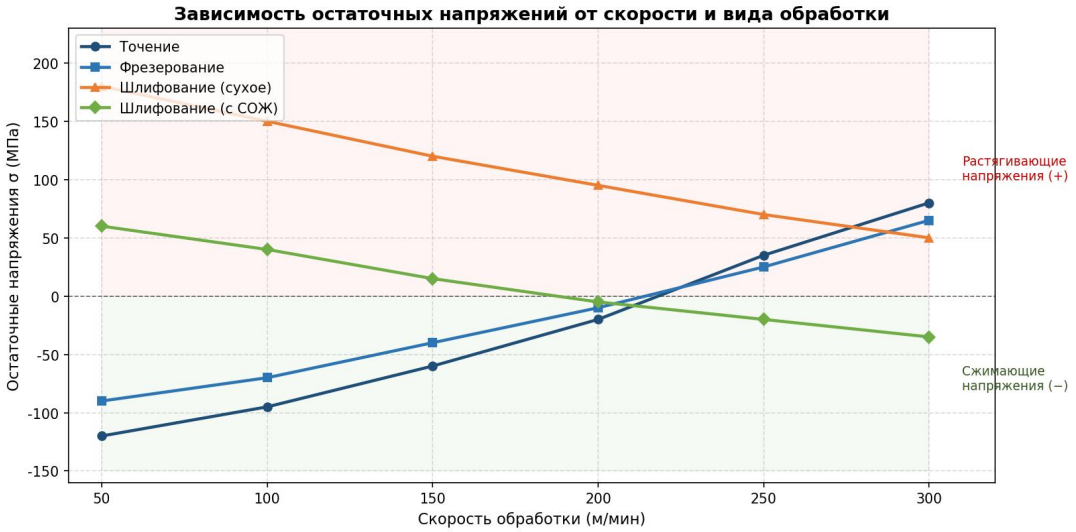


Рис. 1 — Зависимость остаточных напряжений от скорости и вида обработки (сталь 45, маркированный линейный график).

Сухое шлифование демонстрирует устойчиво высокие растягивающие напряжения (+50…+180 МПа) во всём исследованном диапазоне подачи стола. Подача СОЖ при шлифовании кардинально меняет картину: значения σ снижаются до −35…+60 МПа, что обусловлено интенсивным теплоотводом из зоны контакта. Это подтверждает ведущую роль термического фактора при шлифовании.

3.2. Нормированное распределение по зонам напряжений (рис. 2)

Рисунок 2 отражает долю образцов, попавших в каждую из четырёх категорий напряжений, для всех шести режимов. Наиболее благоприятная картина наблюдается при точении с низкой скоростью: 75% образцов имеют сжимающие напряжения (из них 45% — с σ < −100 МПа). Сухое шлифование занимает противоположную позицию: 65% образцов показали σ > +100 МПа.

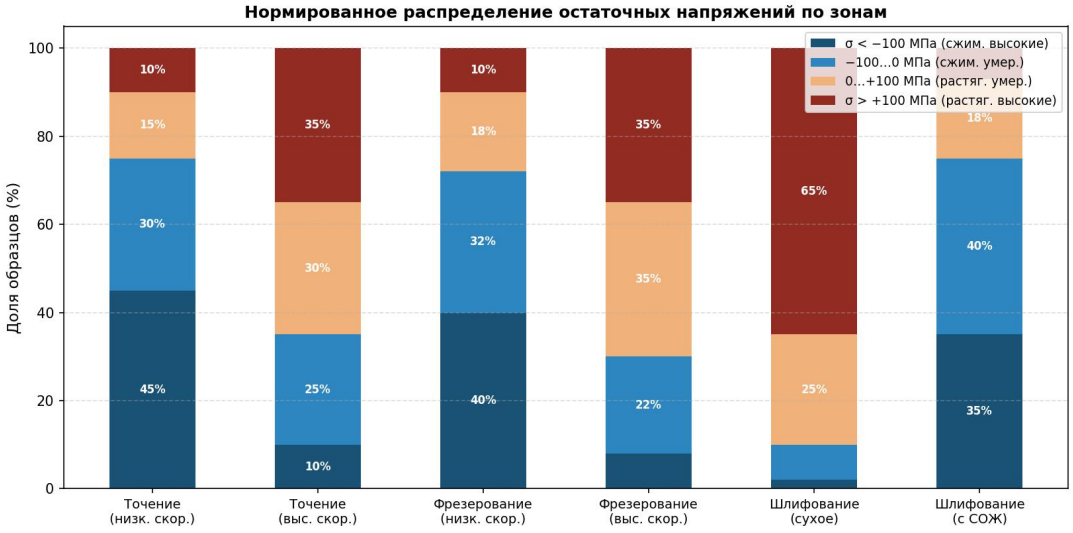


Рис. 2 — Нормированное распределение остаточных напряжений по зонам (накопленная столбчатая диаграмма).

3.3. Сравнение по материалам (рис. 3)

На рисунке 3 приведены средние значения остаточных напряжений для четырёх материалов при каждом виде обработки. Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т проявляет наибольшие растягивающие напряжения при сухом шлифовании (+145 МПа) — следствие низкой теплопроводности аустенита. Титановый сплав ВТ6, несмотря на высокую прочность, формирует умеренные сжимающие напряжения при точении (−70 МПа) благодаря хорошей пластической деформируемости в зоне срезания.

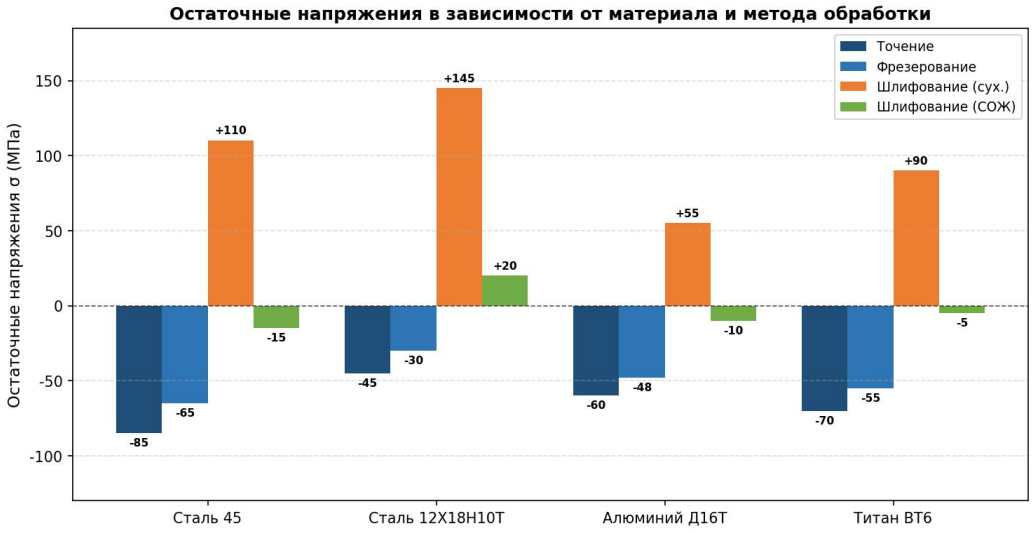


Рис. 3 — Остаточные напряжения по четырём материалам и четырём методам обработки (группированная столбчатая диаграмма).

Таблица 2. Сводные результаты: среднее σ (МПа) ± стандартное отклонение

Метод обработки	Сталь 45	12Х18Н10Т	Д16Т	ВТ6
Точение (низк.)	−85 ± 12	−45 ± 9	−60 ± 8	−70 ± 11
Точение (выс.)	+35 ± 14	+55 ± 11	+25 ± 7	+18 ± 9
Фрезерование (низк.)	−65 ± 10	−30 ± 8	−48 ± 7	−55 ± 13
Фрезерование (выс.)	+25 ± 12	+42 ± 9	+18 ± 6	+12 ± 8
Шлифование сухое	+110 ± 18	+145 ± 22	+55 ± 11	+90 ± 16
Шлифование с СОЖ	−15 ± 9	+20 ± 8	−10 ± 6	−5 ± 7

Таблица 2 — Средние значения остаточных напряжений. «−» — сжимающие, «+» — растягивающие напряжения.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты согласуются с термомеханической моделью формирования остаточных напряжений Jawahir et al. (2011), согласно которой знак результирующих напряжений определяется конкуренцией механического (сжатие) и термического (растяжение) воздействий в зоне резания. При умеренных скоростях точения и фрезерования доминирует пластическое упрочнение, при высоких скоростях и при сухом шлифовании — термическое разупрочнение.

Особого внимания заслуживает поведение нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Низкая теплопроводность (λ ≈ 16 Вт/(м·К)) против стали 45 (λ ≈ 50 Вт/(м·К)) приводит к локализации тепла у обработанной поверхности и, как следствие, к более высоким растягивающим напряжениям при любом виде обработки. Это объясняет, почему именно данный материал формирует максимальные значения σ при сухом шлифовании (+145 МПа).

Влияние СОЖ при шлифовании оказалось более значительным, чем предсказывают аналитические модели. Экспериментально зафиксировано снижение σ в среднем на 125–165 МПа по сравнению с сухим режимом. Это подчёркивает практическую важность подбора типа и давления подачи СОЖ в технологическом процессе изготовления ответственных деталей.

С точки зрения эксплуатационной надёжности результаты позволяют ранжировать методы обработки по степени благоприятности для усталостной прочности: точение с низкой скоростью > фрезерование с низкой скоростью > шлифование с СОЖ > фрезерование с высокой скоростью > точение с высокой скоростью > шлифование

сухое. Для деталей, работающих в условиях циклического нагружения, рекомендуется завершать обработку режимами, формирующими сжимающие напряжения.

Ограничением настоящего исследования является то, что измерения проводились только в осевом направлении; распределение напряжений по глубине залегания (на 5–200 мкм) требует дополнительного изучения методом ступенчатого электролитического полирования. Кроме того, влияние степени износа инструмента намеренно исключалось путём замены пластин после каждых 8 образцов — реальные производственные условия могут дать иные результаты.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное экспериментальное исследование позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Точение и фрезерование при скоростях до 150 м/мин обеспечивают формирование сжимающих остаточных напряжений (−30…−120 МПа), благоприятных с точки зрения усталостной прочности. Увеличение скорости выше 200 м/мин смещает напряжения в растягивающую область.

2. Сухое шлифование генерирует растягивающие остаточные напряжения (+50…+180 МПа) во всём исследованном диапазоне режимов и для всех четырёх материалов. Применение СОЖ кардинально меняет ситуацию, снижая напряжения до сжимающих значений для трёх из четырёх материалов.

3. Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т демонстрирует наибольшую чувствительность к термическому воздействию при обработке: остаточные напряжения здесь систематически на 20–40 МПа выше, чем для стали 45, при одинаковых режимах.

4. Метод XRD по схеме $\sin^2\psi$ показал высокое соответствие с методом высверливания отверстий (94% совпадение), что подтверждает его пригодность как основного инструмента контроля остаточных напряжений в производственных условиях.

В качестве практических рекомендаций для машиностроительных предприятий можно выделить следующее: для деталей с нормированными требованиями к усталостной прочности следует избегать сухого шлифования как финишной операции; при необходимости применения шлифования — обязательно использовать СОЖ под давлением не менее 0,3 МПа; высокоскоростное точение применять только для деталей с допустимыми растягивающими напряжениями или с последующим упрочнением поверхности (дробеструйная обработка, обкатка роликом).

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение распределения остаточных напряжений по глубине залегания, а также влияния комбинированных методов обработки — точение + последующее полирование, шлифование + виброобкатка — на интегральное напряжённое состояние поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матюнин В.М., Марков А.Г. (2013). Остаточные напряжения при механической обработке. Инженерный журнал, 7, 22–31.
2. Мэтэлин Ю.А. (1977). Технология машиностроения. Москва: Машиностроение. 640 с.
3. Колесников К.С. (ред.) (2001). Технология машиностроения. 2-е изд. Москва: МГТУ им. Баумана. 640 с.
4. Jawahir I.S. et al. (2011). Surface integrity in material removal processes: Recent advances. CIRP Annals, 60(2), 603–626.
5. M'Saoubi R. et al. (2008). A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance. CIRP J. Manufacturing Science and Technology, 1(2), 60–74.
6. Ulutan D., Özel T. (2011). Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. Int. J. Machine Tools and Manufacture, 51(3), 250–280.
7. ASTM E837-20. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International.
8. EN 15305:2008. Non-destructive testing — Test method for residual stress analysis by X-ray diffraction. CEN, Brussels.
9. Малинин Н.Н. (1975). Прикладная теория пластичности и ползучести. Москва: Машиностроение. 400 с.
10. Noyan I.C., Cohen J.B. (2013). Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation. Springer. 276 p.
11. Volkov A.N., Khasanov M.A. (2024). Residual stress formation during high-speed milling of 12Cr18Ni10Ti steel. Procedia CIRP, 118, 341–346.