

УДК 621.793.71

Исследование точности механической обработки ступенчатых валов на токарном станке с ЧПУ

Ф.Г. Амиров¹, В.А. Аббасов¹, С.Ф. Амирли¹, С. Симон², Э.З. Гадымов³

¹ Азербайджанский Технический Университет

² Brandenburg University of Technology

³ MB ATECH GmbH Deutschland

Studying accuracy of the stepped shafts machining on the CNC lathe

F.G. Amirov¹, V.A. Abbasov¹, S.F. Amirli¹, Silvio Simon², E.Z. Gadymov³

¹ Azerbaijan Technical University

² Brandenburg University of Technology

³ MB ATECH GmbH Deutschland

Токарные станки с ЧПУ, удовлетворяющие высоким требованиям к точности токарной обработки изделий, находят широкое применение при изготовлении ступенчатых валов. Их преимуществом перед универсальными токарными станками является не только высокая точность, но и способность обрабатывать сложные детали и автоматизировать рабочий процесс. Рассмотрена возможность высокоточной обработки несущих валов двухколесного десятитонного мостового крана на токарных станках. На основании конструкторско-технологического расчета установлено, что при обработке ступенчатого вала мостового крана на универсальных токарных станках трудно достичь требуемых точности и шероховатости поверхности. Использование токарного станка с ЧПУ устранило многие недостатки процесса чистового точения ступенчатого вала. Показано, что на точность чистовой обработки ступенчатого вала на токарном станке с ЧПУ существенно влияют параметры режима резания. Проведены исследования, позволившие определить значения этих параметров, обеспечивающие наибольшую точность изготовления ступенчатого вала.

EDN: VQIEOP, <https://elibrary/vqieop>

Ключевые слова: станки с ЧПУ, токарный станок, ступенчатый вал, параметры режима резания, сила резания, отклонение размеров

CNC lathes meeting high requirements to the product lathe machining accuracy are widely used in manufacture of the stepped shafts. Their advantage over universal lathes lies not only in the high accuracy, but also in the ability to machine complex parts and automate the working process. The paper considers possibility of reaching high precision in machining the stepped shafts of a 10-ton overhead crane on the lathes. Based on design and technological computation, it was difficult to achieve the required accuracy and roughness of the machined surface in machining a stepped shaft of the overhead crane on a universal lathe. Using the CNC lathe eliminated many of the disadvantages of the step shaft finishing lathing. The paper shows that accuracy of the stepped shaft finishing on a CNC lathe is significantly influenced by the cutting mode parameters. Studies were performed making it possible to determine those parameters values that ensured the highest accuracy in the stepped shaft manufacture.

EDN: VQIEOP, <https://elibrary/vqieop>

Keywords: CNC machines, lathe, stepped shaft, cutting parameters, cutting force, dimensional deviation

Основными факторами, определяющими типовой технологический процесс изготовления ступенчатого вала (СВ), в том числе для мостового крана, являются [1–8] размеры и объем выпуска СВ, метод получения заготовки, форма детали и точность обработки. Помимо перечисленных факторов на параметры технологического процесса значительно влияет токарный станок с ЧПУ для обработки СВ.

При этом размеры СВ во многом определяют выбор характеристик оборудования для его изготовления, что оказывает существенное влияние на характер технологического процесса обработки СВ. Детали одинаковой формы, но разных размеров имеют одинаковую кинематику формообразования поверхностей. Однако при значительной разнице размеров деталей их кинематика формообразования поверхностей может существенно различаться [9–12].

Станки с ЧПУ получили широкое распространение в современном машиностроительном производстве. Их использование при производстве СВ позволяет достичь требуемой точности изготавливаемых деталей. Точность размеров СВ мостового крана является одним из важных критериев, определяющих качество, что существенно влияет на эффективность его эксплуатации.

В связи с этим при обработке СВ на станках с ЧПУ выбор соответствующих параметров технологического процесса и режимов резания позволяет достичь высокой точности чистового точения. Также необходимо учитывать влияние параметров режима обработки на шероховатость поверхности СВ [9–17].

Другими достоинствами станков с ЧПУ являются способность обработки сложных деталей и автоматизация этого производства. При этом автоматизация процесса позволяет организовать массовое производство деталей, реализуя запрограммированную кодированную токарную операцию на станках. Точность механической обработки СВ на токарных станках с ЧПУ проверяют путем осмотра СВ и анализа погрешностей, возникающих при резании и размещении деталей типа тела вращения в патроне, и их размеров [18–24].

Так как СВ широко применяют на нефтяных машиностроительных заводах Азербайджана при производстве мостовых кранов, улучшение технологического процесса изготовления СВ позволит значительно уменьшить его трудоемкость.

Исследование точности и шероховатости поверхности после чистового точения СВ двухколесного десятитонного мостового крана проводили на токарном станке с ЧПУ INTEGREX i-250H S, что позволило одновременно обработать все ступени СВ с одной установкой. Применение станка с ЧПУ обеспечило устранение недостатков и отклонений от заданных требований, присущих обычному технологическому процессу обработки СВ на универсальных станках [8].

Цель работы — исследование точности СВ при обработке на токарном станке с ЧПУ.

Методика исследования. Точность и шероховатость поверхности СВ мостового крана, обработанных на токарном станке с ЧПУ, зависит от режимов чистового точения, глубины резания, продольной подачи на оборот (далее продольная подача) и скорости резания.

Исследование по определению точности, шероховатости и деформации обработанных СВ мостового крана выполняли на токарном станке с ЧПУ INTEGREX i-250H S. При точении заготовки использовали твердосплавный резец с механическим креплением.

В качестве материала сменной трехгранной пластины выступал твердый сплав Т5К10, который согласно ГОСТ 3882–74 (Код ОКП 196611) имел следующий химический состав, %: TiC — 5; Co — 10; WC — 85. При диаметре пластины 19,05 мм радиус округления режущей кромки составлял 0,05...0,08 мм. Толщина пластины — 6,35 мм. Геометрические параметры режущего инструмента: передний угол $\gamma = 15^\circ$; задний угол $\alpha = 11^\circ$; угол при вершине $\varphi = 55^\circ$.

Результаты и их обсуждение. Для выявления отклонений размеров ступеней от заданных и определения технологических возможностей чистового точения на станках с ЧПУ рассмотрен чертеж СВ колеса мостового крана (рис. 1).

Как известно, у СВ мостового крана диаметр должен быть меньше, чем у отверстия, в которое он посажен. Чтобы получить зазор между отверстием и СВ, отверстие должно иметь диаметр 130H7, а СВ — 130k6.

Диаметр первой ступени СВ должен составлять 135H7/k6, диаметр второй ступени — 135H7/f8. В этом случае характер посадки между отверстиями и СВ будет определяться следующим образом.

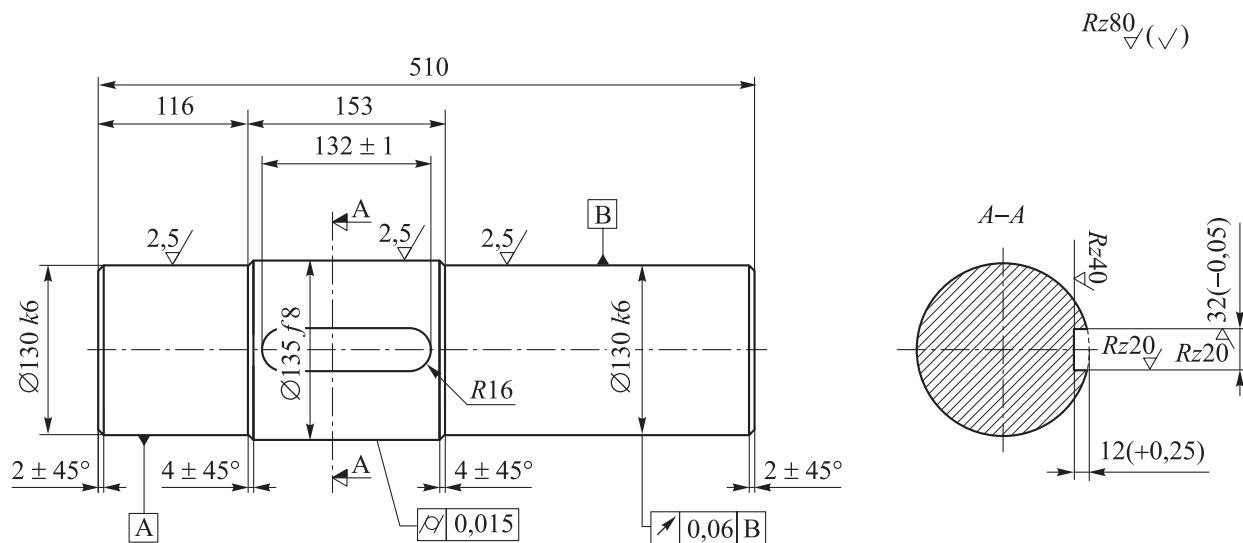


Рис. 1. Чертеж СВ колеса мостового крана

Максимальный зазор для первой ступени СВ

$$T_{\max з} = D_{\max \text{ отв}} - D_{\min в} = 130 \frac{H7}{k6} = \frac{130_0^{+0,04}}{130_{+0,003}^{+0,028}} = 130,04 - 130,003 = 0,037 \text{ мм,}$$

где $D_{\max \text{ отв}}$ — максимальный диаметр отверстия; $D_{\min в}$ — минимальный диаметр СВ.

Максимальный натяг для первой ступени СВ

$$T_{\max н} = D_{\min \text{ отв}} - D_{\max в} = 130 \frac{H7}{k6} = \frac{130_0^{+0,04}}{130_{+0,003}^{+0,028}} = 130 - 130,028 = -0,028 \text{ мм,}$$

где $D_{\min \text{ отв}}$ — минимальный диаметр отверстия; $D_{\max в}$ — максимальный диаметр СВ.

Максимальный зазор для второй ступени СВ

$$T_{\max з} = D_{\max \text{ отв}} - D_{\min в} = 135,04 - 134,894 = 0,146 \text{ мм.}$$

Максимальный натяг для второй ступени СВ

$$T_{\max н} = D_{\min \text{ отв}} - D_{\max в} = 135 - 135,043 = -0,043 \text{ мм.}$$

При производстве СВ колеса мостового крана на универсальных токарных станках технологически сложно соблюсти требования к точности размеров, указанных на чертеже (см. рис. 1). Так как прецизионная обработка СВ на универсальном токарном станке выполняется в нескольких переходах и позициях, возникает много случайных ошибок, что не позволяет получить необходимую точность точения.

При обработке разных диаметров СВ сложно обеспечить посадку по расчетным размерам. Размеры отверстия диаметром 130 мм следует

изготавливать по посадке H7, а СВ — по посадке k6. В этом случае натяг посадки должен составлять 0,028 мм, а зазор — 0,037 мм. Размеры отверстия диаметром 135 мм следует выполнять по посадке H7, а СВ — по посадке f8. При таком соединении зазор должен быть равен 0,146 мм, а натяг — 0,043 мм.

Таким образом, при изготовлении СВ мостового крана на универсальных токарных станках получистовая и чистовая обработка осуществляются на различных позициях, что приводит к большим погрешностям.

При проведении получистовых и чистовых операций на различных позициях возникает смещение заготовки, а также изменение кинематических параметров процесса резания. Значения кинематических углов, скорости резания и продольной подачи относительно частоты вращения шпинделя изменяются, что вызывает дополнительные погрешности в позиционировании режущего инструмента. Это приводит к изменению условий силовых, тепловых деформаций и вибрации при резании на различных операциях.

При обработке СВ на станках с ЧПУ совмещение получистовой и чистовой операций исключает появление дополнительных погрешностей изготовления деталей, что связано с их конструктивными особенностями. Токарные станки с ЧПУ оснащены системами позиционирования и регулирования шпинделя, а также автоматической сменой режущего инструмента, обеспечивающей устранение установочных, случайных ошибок.

Согласно расчетно-технологическим исследованиям, токарная обработка СВ колеса мостового крана за одну операцию на станках, управляемую цифровой программой, обеспечивает требуемую точность обработки благодаря исключению многих случайных погрешностей.

Одним из основных условий механической обработки СВ мостового крана является высокопроизводительная обработка, обеспечивающая точность размеров и незначительную шероховатость поверхности. Для этого система станок — приспособление — инструмент — деталь, которая является одним из основных критериев работоспособности и точности станка под нагрузкой, должна быть устойчива к вибрациям, уменьшая систематические погрешности, повторяющиеся в процессе обработки.

В станках с программным управлением систематические слагаемые погрешности можно компенсировать для соответствия размерам чертежа СВ мостового крана с помощью заранее программируемых корректируемых сигналов. Токарный станок с ЧПУ оснащен системой следящего привода, называемой замкнутой в обратной связи и обеспечивающей точность копированием ± 10 мкм.

Для проверки точности изготовления СВ диаметром 130 мм после чистовой токарной обработки на станке с ЧПУ непосредственно на нем измеряли размеры полученного изделия с помощью микрометра. В каждом режиме обработки определяли размеры десяти образцов.

Полученные результаты — зависимости точности обработки Δ СВ диаметром 130 мм от глубины резания t , продольной подачи $S_{пр}$ и скорости резания v — приведены на рис. 2, где кривые построены по средним значениям десяти измерений.

Видно, что с увеличением глубины резания точность обработки СВ монотонно снижается (красная кривая): при $t = 0,2$ мм $\Delta = 55$ мкм, а при $t = 1,2$ мм $\Delta = 64$ мкм.

Влияние продольной подачи на точность обработки СВ (синяя кривая) исследовано при $t = 0,6$ мм и $v = 100$ м/мин. Установлено, что при увеличении продольной подачи от 0,10 до 0,35 мм/об точность обработки СВ составляет 31 мкм. С ростом величины $S_{пр}$ синяя кривая, показывающая влияние продольной подачи на точность обработки, имеет значительно больший угол подъема по сравнению с красной

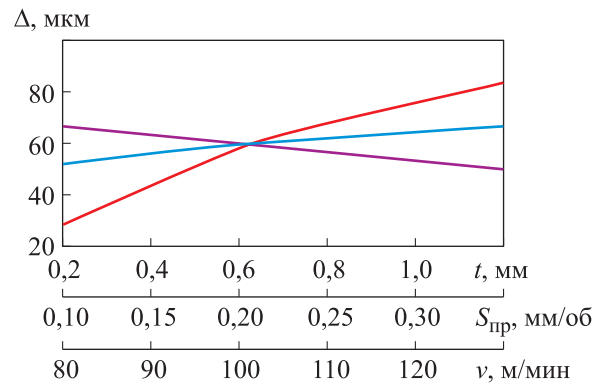


Рис. 2. Зависимости точности обработки Δ СВ диаметром 130 мм от глубины резания t (—), продольной подачи $S_{пр}$ (—) и скорости резания v (—) при чистовой токарной обработке СВ

кривой, характеризующей изменение точности обработки СВ от глубины резания.

Кроме того, с ростом продольной подачи значительно изменяется характер схода стружки, увеличиваются динамические показатели процесса резания и шероховатость поверхности, что также влияет на точность обработки СВ [25]. Таким образом, продольная подача является одним из важных параметров, влияющих на точность чистовой токарной обработки СВ.

Известно [1], что с возрастанием продольной подачи при токарной обработке заготовки на ее поверхности с одной стороны появляется упрочнение слоев металла, а с другой — в зоне обработки — выделяется большое количество теплоты из-за увеличения сил резания. Это приводит к некоторому размягчению материала заготовки, что также влияет на точность обработки.

Установлено, что увеличение скорости резания оказывает положительное влияние на точность обработки вала диаметром 130 мм (фиолетовая кривая): при $v = 80$ м/мин $\Delta \approx 65$ мкм, а при $v = 120$ м/мин $\Delta = 53$ мкм. Это связано с кинематическими процессами резания, т. е. с ростом скорости резания повышается частота вращения шпинделя станка, что приводит к снижению объема снимаемого припуска на один оборот. Поэтому уменьшается сила резания, что положительно влияет на точность обработки СВ при чистовом точении на станке с ЧПУ.

Одним из параметров механической обработки СВ на станке ЧПУ, влияющим на его эксплуатационные показатели, является шероховатость обработанной поверхности. В связи

с этим проведены эксперименты по определению влияния режимов чистового точения на формирование шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности измеряли стандартным методом с помощью профилометра-профилографа модели 201 производства завода «Калибр».

Полученные результаты — зависимости шероховатости поверхности СВ Ra от глубины резания t , продольной подачи $S_{пр}$ и скорости резания v при чистовой токарной обработке СВ — приведены на рис. 3.

Чтобы обеспечить точность экспериментальных данных, при определении зависимости шероховатости поверхности СВ Ra от глубины резания t (красная кривая) продольную подачу $S_{пр}$ принимали равной 0,2 мм/об, а скорость резания — 100 м/мин. Влияние продольной подачи $S_{пр}$ на шероховатость поверхности СВ Ra (синяя кривая) выявляли при $t = 0,6$ мм и $v = 100$ м/мм. Зависимость шероховатости поверхности СВ Ra от скорости резания (фиолетовая кривая) определяли при $t = 0,6$ мм и $S_{пр} = 0,2$ мм/об.

Анализ полученных результатов показал, что продольная подача $S_{пр}$ значительно больше влияет на шероховатость поверхности СВ, чем глубина резания, что объясняется кинетическим процессом съема стружки при точении. Известно, что при увеличении продольной подачи в контактной зоне на обработанной поверхности высота остаточных микронеровностей остается большей, чем при изменении других параметров режима резания.

С увеличением скорости резания шероховатость обработанной поверхности постепенно снижается (фиолетовая кривая): при $v = 80$ м/мин $Ra = 3,10$ мкм, при $v = 120$ м/мин

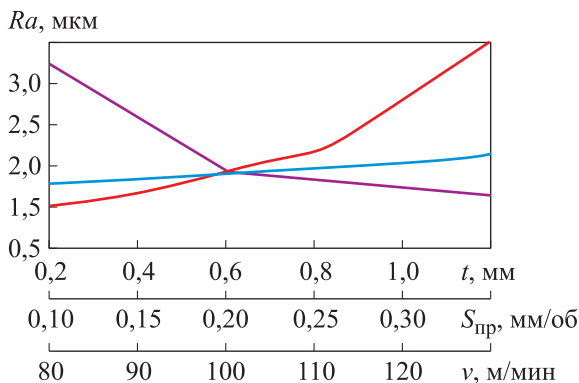


Рис. 3. Зависимости шероховатости поверхности Ra СВ диаметром 130 мм от глубины резания t (—), продольной подачи $S_{пр}$ (—) и скорости резания v (—) при чистовой токарной обработке СВ

$Ra = 1,78$ мкм. Это обусловлено тем, что с ростом скорости резания значительно снижается сила резания, что приводит к уменьшению деформации остаточной поверхности при съеме стружки. Также с увеличением скорости резания растет температура съема стружки, что способствует улучшению условий съема стружки.

При чистовом точении СВ на токарных станках с ЧПУ шероховатость поверхности во многом зависит от времени обработки и стойкости режущего инструмента. В связи с этим проведены эксперименты по измерению шероховатости поверхности при чистовом точении СВ мостового крана диаметром 130 мм в зависимости от времени обработки.

Шероховатость поверхности СВ определяли после десяти, двадцати и тридцати минут обработки. После 10-минутной обработки новым резцом шероховатость поверхности Ra составила 1,76 мкм, после 20-минутной обработки — 3,10 мкм. С увеличением времени точения на токарных станках с ЧПУ повышение шероховатости обработанной поверхности связано с изменением геометрической формы режущей кромки инструмента и его износом. В процессе резания режущая кромка инструмента монотонно изнашивается, что снижает его режущую способность, а следовательно, увеличивает шероховатость обработанной поверхности.

Анализ результатов исследования точности и шероховатости обработанной поверхности при чистовом точении СВ на токарных станках с ЧПУ показал, что они существенно зависят от режимных параметров t , $S_{пр}$ и v . Это обусловлено тем, что изменение режимных параметров приводит к изменению динамических показателей резания: шероховатости Rz , тангенциальной P_z , радиальной P_y и осевой P_x составляющих силы резания.

Известно [7], что при точении детали наиболее существенно изменяется тангенциальная составляющая силы резания P_z . Поэтому при проведении экспериментов приняли решение определять величину P_z . Тангенциальную составляющую силы резания P_z измеряли однокомпонентным динамометром, на котором закрепляли резец.

Силу резания вычисляли по формуле

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2} = 1,13P_z.$$

Полученные результаты — зависимости тангенциальной составляющей силы резания P_z от глубины резания t , продольной подачи $S_{пр}$ и

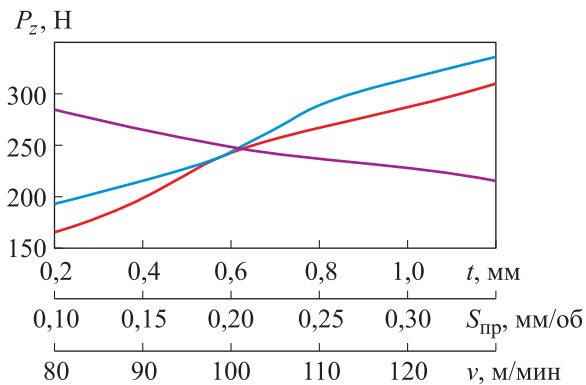


Рис. 4. Зависимости тангенциальной составляющей силы резания P_z от глубины резания t (—), продольной подачи $S_{пр}$ (—) и скорости резания v (—) при чистовой токарной обработке СВ

скорости резания v при чистовой токарной обработке СВ — приведены на рис. 4.

Видно, что увеличение глубины резания t и продольной подачи $S_{пр}$ приводит к возрастанию тангенциальной составляющей силы резания P_z . Это связано с ростом геометрических параметров (ширины и глубины) стружки, что повышает деформацию ее схода, а также динамические показатели процесса резания.

С ростом скорости резания тангенциальная составляющая силы резания P_z монотонно снижается. Это обусловлено увеличением температуры при резании припуска, вследствие чего уменьшается прочность материала, верхний слой припуска нагрева становится более мягким, что приводит к снижению силы резания P_z .

Выводы

1. На основании конструкторско-технологических расчетов размеров СВ мостового крана выявлено, что при обработке СВ на универсальных токарных станках трудно обеспечить требуемые точность и шероховатость поверхности СВ.

2. Установлено, что при обработке СВ на универсальных токарных станках возникает отклонение оси отдельных ступеней СВ вслед-

ствие смещения и вибрации суппорта с режущим инструментом, что приводит к возникновению погрешности режущего инструмента относительно заготовки, в результате чего возникают кинематические погрешности поверхности СВ.

3. Показано, что обработка СВ на токарном станке с ЧПУ INTEGREX i-250H S устраняет многие недостатки и неточности процесса чистового точения.

4. Определено, что точность чистовой обработки СВ на станках с ЧПУ во многом зависит от режимов резания. При увеличении глубины резания от 0,2 до 1,2 мм точность обработки снижается от 0,55 до 0,66 мм, т. е. примерно на 10 %. При возрастании продольной подачи с 0,1 до 0,35 мм/об точность обработки СВ уменьшается в 2,5 раза, а рост скорости резания приводит к повышению точности обработки на 12...15 %, что связано с кинематическими процессами резания стружки и снижением сил резания.

5. Выявлено, что режимы чистового точения СВ на токарных станках с ЧПУ значительно влияют на формирование шероховатости обработанной поверхности. При увеличении продольной подачи от 0,1 до 0,35 мм/об шероховатость поверхности повышается от 1,53 до 3,7 мкм, а с увеличением глубины резания от 0,2 до 1,2 мм — от 1,35 до 2,1 мкм. С возрастанием скорости резания шероховатость обработанной поверхности снижается от 3,25 до 2,75 мкм. Поэтому для обеспечения требуемой шероховатости поверхности СВ точение рекомендуется проводить при наибольшей допустимой скорости резания.

6. Установлено влияние режимов чистового точения СВ мостового крана на станках с ЧПУ на динамические показатели обработки, определены значения силы резания. С увеличением глубины резания и продольной подачи сила резания растет, а с повышением скорости резания — монотонно падает, что благоприятно влияет на другие показатели технологического процесса.

Литература

- [1] Yousefi S., Zohoor M. Experimental studying of the variations of surface roughness and dimensional accuracy in dry hard turning operation. *Open Mech. Eng. J.*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 175–191, doi: <http://dx.doi.org/10.2174/1874155X01812010175>
- [2] Yousefi S., Zohoor M., Faraji M. The variations of dimensional accuracy in dry hard turning operation. *25th Annual Int. Conf. ISME2017*, 2017, vol. ISME2017-2352.

- [3] Zohoor M., Yousefi S. Experimental investigation of the effect of processing parameters on the surface roughness operation for using as expert system database. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2018, vol. 40, no. 5, art. 273, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1187-4>
- [4] El-Hossainy T.M., El-Zoghby A.A., Badr M.A. et al. Cutting parameter optimization when machining different materials. *Mater. Manuf. Process.*, 2010, vol. 25, no. 10, pp. 1101–1114, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.480998>
- [5] Юсубов Н.Д., Аббасова Х.М. Полнофакторная матричная модель точности выполняемых размеров на многоцелевых станках с ЧПУ. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2021, № 4, с. 6–20.
- [6] Новиков Ф.В., Якимов А.В., ред. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения*. Т. 7. Точность обработки деталей машин. Одесса, ОНПУ, 2004. 546 с.
- [7] Дольский А.М., Суслов А.Г., Косилова А.Г. и др. *Справочник технолога-машиностроителя*. Т. 2. Москва, Машиностроение, 2003. 944 с.
- [8] Аббасов В.А., Баширов Р.Дж. Особенности применения ультразвука при плазменно-механической обработке деталей из труднообрабатываемых материалов. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2022, № 3, с. 53–65, doi: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2022-24.3-53-65>
- [9] Амиров Ф.Г. Некоторые особенности повышение производительности автоматических линий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 9, с. 18–23, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-9-18-23>
- [10] Амиров Ф.Г. Объединение инструментальных блоков в позиции механической обработки сплавов с направленной кристаллизацией эвтектических структур на многопоточных автоматических линиях. *Вестник машиностроения*, 2020, № 10, с. 79–81.
- [11] Амиров Ф.Г. Особенности механической обработки на позициях. *Вестник машиностроения*, 2013, № 1, с. 49–51.
- [12] Амиров Ф.Г. *Повышение эффективности автоматических линий с гибкой связью за счет транспортно-накопительных систем тупикового типа*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, ИКТИ РАН, 1997. 138 с.
- [13] Amirov F.G. Developing criterion and optimization of PAL system. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, vol. 379, pp. 244–249.
- [14] Amirov F.G. Die Klassifizierung von Bauteilen für Regulier-Bzw. Einrichtbaren Automatischen Fertigungslinien unter Verwendung von CNC Werkzeugmaschinen. *Energieeffizienz im Bau und Maschinenwesen*, 2017, pp. 7–11.
- [15] Amirov F.G., Gadimov E.Z., Nabiev G.N. Calculation of the accuracy of shaft processing on CNC machines. *Proc. Republican Sci. Tech. Conf. Youth and Scientific Innovations*. Baku, AzTU, 2022, pp. 785–790.
- [16] Amirli S.F., Fritsche P., Abbasov I.T. et al. The impact of high speed mechanical processing efficiency on the production process. *Herald of the Azerbaijan Engineering academy*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 41–51.
- [17] Кошин А.А., Юсубов Н.Д. Элементы матричной теории точности многоинструментной обработки в пространственных наладках. *Вестник машиностроения*, 2013, № 9, с. 13–17.
- [18] Hehenberger P. *Computerunterstützte Fertigung*. Springer, 2011. 265 p.
- [19] Петраков Ю.В., Драчев О.И. *Автоматическое управление процессами резания*. Старый Оскол, ТНТ, 2011. 407 с.
- [20] Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Схиртладзе А.Г. и др. *Автоматизация технологических и производственных процессов в машиностроении*. Старый Оскол, ТНТ, 2009. 656 с.
- [21] Кондаков А.И., Васильев А.С. *Выбор заготовок в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 2007. 560 с.
- [22] Кошин А.А., Юсубов Н.Д. Аналитические основы моделей силового взаимодействия подсистем технологической системы в процессах обработки резанием. *Современные проблемы машиностроения и приборостроения. Док. межд. науч.-техн. конф.* Баку, АзТУ, 2005, с. 67–70.

- [23] Базров Б.М. *Основы технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2007. 736 с.
- [24] Strenkowski J.S., Moon K.J. Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distributions in orthogonal metal cutting. *J. Eng. Ind.*, 1990, vol. 112, no. 4, pp. 313–318, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2899593>
- [25] Popov M., Popov A., Al-Obaidi L. Improving the accuracy of manufacturing long shafts and axes of precast rotors. *E3S Web Conf.*, 2019, vol. 135, art. 01060, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501060>

References

- [1] Yousefi S., Zohoor M. Experimental studying of the variations of surface roughness and dimensional accuracy in dry hard turning operation. *Open Mech. Eng. J.*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 175–191, doi: <http://dx.doi.org/10.2174/1874155X01812010175>
- [2] Yousefi S., Zohoor M., Faraji M. The variations of dimensional accuracy in dry hard turning operation. *25th Annual Int. Conf. ISME2017*, 2017, vol. ISME2017-2352.
- [3] Zohoor M., Yousefi S. Experimental investigation of the effect of processing parameters on the surface roughness operation for using as expert system database. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2018, vol. 40, no. 5, art. 273, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1187-4>
- [4] El-Hossainy T.M., El-Zoghby A.A., Badr M.A. et al. Cutting parameter optimization when machining different materials. *Mater. Manuf. Process.*, 2010, vol. 25, no. 10, pp. 1101–1114, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.480998>
- [5] Yusubov N.D., Abbasova Kh.M. Full-factor matrix model of accuracy of dimensions performed on multi-purpose CNC machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science], 2021, no. 4, pp. 6–20. (In Russ.).
- [6] Novikov F.V., Yakimov A.V., eds. *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya*. T. 7. *Tochnost obrabotki detaley mashin* [Physical and mathematical theory of material processing processes and engineering technology. Vol. 7. Accuracy of machining of machine parts]. Odessa, ONPU Publ., 2004. 546 p. (In Russ.).
- [7] Dolskiy A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G. et al. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya*. T. 2 [Handbook of the technologist-machine engineer. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 944 p. (In Russ.).
- [8] Abbasov V.A., Bashirov R.Dzh. Features of ultrasound application in plasma-mechanical processing of parts made of hard-to-process materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science], 2022, no. 3, pp. 53–65, doi: <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2022-24.3-53-65> (in Russ.).
- [9] Amirov F.G. Some aspects of increasing the efficiency of automated production lines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2020, no. 9, pp. 18–23, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2020-9-18-23> (in Russ.).
- [10] Amirov F.G. Unification of instrumental units in the position of mechanical processing of alloys with directional crystallization of eutectic structures on multi-stream automatic lines. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 10, pp. 79–81. (In Russ.).
- [11] Amirov F.G. Distinctive features of machining operation at positions. *Vestnik mashinostroeniya*, 2013, no. 1, pp. 49–51. (In Russ.).
- [12] Amirov F.G. *Povyshenie effektivnosti avtomaticheskikh liniy s gibkoy svyazyu za schet transportno-nakopitelnykh sistem tupikovogo tipa*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the efficiency of automatic lines with flexible coupling by means of dead-end transport and storage systems. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, IKTI RAN Publ.1997. 138 p. (In Russ.).
- [13] Amirov F.G. Developing criterion and optimization of PAL system. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, vol. 379, pp. 244–249.
- [14] Amirov F.G. Die Die Klassifizierung von Bauteilen für Regulier-Bzw. Einrichtbaren Automatischen Fertigungslinien unter Verwendung von CNC Werkzeugmaschinen. *Energieeffizienz im Bauund Maschinenwesen*, 2017, pp. 7–11.

- [15] Amirov F.G., Gadimov E.Z., Nabiev G.N. Calculation of the accuracy of shaft processing on CNC machines. *Proc. Republican Sci. Tech. Conf. Youth and Scientific Innovations*. Baku, AzTU, 2022, pp. 785–790.
- [16] Amirli S.F., Fritsche P., Abbasov I.T. et al. The impact of high speed mechanical processing efficiency on the production process. *Herald of the Azerbaijan Engineering academy*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 41–51.
- [17] Koshin A.A., Yusubov N.D. Elements of matrix theory of multitool processing accuracy in three-dimensional setups. *Vestnik mashinostroeniya*, 2013, no. 9, pp. 13–17. (In Russ.).
- [18] Hehenberger P. Computerunterstützte Fertigung. *Springer*, 2011. 265 p.
- [19] Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Avtomaticheskoe upravlenie protsessami rezaniya* [Automatic control of cutting processes]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2011. 407 p. (In Russ.).
- [20] Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Skhirtladze A.G. et al. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii* [Automation of technological and production processes in mechanical engineering]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2009. 656 p. (In Russ.).
- [21] Kondakov A.I., Vasilyev A.S. *Vybor zagotovok v mashinostroenii* [Choice of blanks in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 560 p. (In Russ.).
- [22] Koshin A.A., Yusubov N.D. [Analytical bases of models of force interaction of subsystems of technological system in processes of machining by cutting]. *Sovremennye problemy mashinostroeniya i priborostroeniya. Dok. mezhd. nauch.-tekhn. konf.* [Modern Problems of Mechanical Engineering and Instrument-Making. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Baku, AzTU Publ., 2005, pp. 67–70. (In Russ.).
- [23] Bazrov B.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Fundamentals of engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 736 p. (In Russ.).
- [24] Strenkowski J.S., Moon K.J. Finite element prediction of chip geometry and tool/workpiece temperature distributions in orthogonal metal cutting. *J. Eng. Ind.*, 1990, vol. 112, no. 4, pp. 313–318, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2899593>
- [25] Popov M., Popov A., Al-Obaidi L. Improving the accuracy of manufacturing long shafts and axes of precast rotors. *E3S Web Conf.*, 2019, vol. 135, art. 01060, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501060>

Статья поступила в редакцию 28.11.2023

Информация об авторах

АМИРОВ Фариз Гачай оглы — доктор технических наук, профессор кафедры «Специальные технологии и оборудование». Азербайджанский технический университет (Az-1073, Баку, Азербайджанская Республика, пр. Гусейн Джавида, д. 25, e-mail: fariz.67@mail.ru).

АББАСОВ Вагиф Аббас оглы — доктор технических наук, профессор кафедры «Специальные технологии и оборудование». Азербайджанский технический университет (Az-1073, Баку, Азербайджанская Республика, пр. Гусейн Джавида, д. 25, e-mail: abbasov49@aztu.edu.az).

АМИРЛИ Самир Фариз оглы — докторант кафедры «Технология машиностроение». Азербайджанский Технический Университет (Az-1073, Баку, Азербайджанская Республика, пр. Гусейн Джавида-25, e-mail: amirlsam@b-tu.de).

Information about the authors

AMIROV Fariz Gachay — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Special Technologies and Equipment. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, Huseyn Javid Ave, Bldg. 25, e-mail: fariz.67@mail.ru).

ABBASOV Vagif Abbas — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Special Technologies and Equipment. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, Huseyn Javid Ave, Bldg. 25, e-mail: abbasov49@aztu.edu.az).

AMIRLI Samir Fariz — Doctoral Candidate, Department of Mechanical Engineering Technology. Azerbaijan Technical University (Az-1073, Baku, Azerbaijan Republic, Huseyn Javid Ave, 25, e-mail: amirlsam@b-tu.de).

СИМОН Сильвио — доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущий станки». Бранденбургский технологический университет Branderbugische Technische Universitet (01968, Германия, Universitätsplatz 1, Cottbus-Senftenberg, Senftenberg, e-mail: sylvio.simon@b-tu.de).

SIMON Sylvio — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Metal Cutting Machines. Brandenburg University of Technology (01968, Germany, Universitätsplatz 1, Cottbus-Senftenberg, Senftenberg, e-mail: sylvio.simon@b-tu.de).

ГАДЫМОВ Эмиль Захид оглы — техник-мехатроник. MB ATECH GmbH (93426, Германия, Josef-Mühlbauer-Platz-1, Roding, e-mail: emil.gadim@gmail.com).

GADIMOV Emil Zahid — Mechatronics Technician. MB ATECH GmbH (Deutschland, Josef-Mühlbauer-Platz-1, 93426 Roding, e-mail: emil.gadim@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Амиров Ф.Г., Аббасов В.А., Амирли С.Ф., Симон С., Гадымов Э.З. Исследование точности механической обработки ступенчатых валов на токарном станке с ЧПУ. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 7, с. 55–64.

Please cite this article in English as:

Amirov F.G., Abbasov V.A., Amirli S.F., Simon S., Gadymov E.Z. Studying accuracy of the stepped shafts machining on the CNC lathe. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 7, pp. 55–64.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие А.А. Забровской
«Профессионально-ориентированный перевод.
Английский язык»**

Представлены материалы для лекционных и семинарских занятий, предназначенные для аудиторной и внеаудиторной работы студентов над профессионально-ориентированным английским языком в области перевода. Цель данного пособия — формирование и закрепление теоретических знаний, а также практических навыков, необходимых для выполнения профессионально-ориентированного перевода. Подобраны аутентичные англоязычные материалы по наиболее востребованным темам для будущих переводчиков в сфере профессиональной коммуникации. Каждый из трех модулей включает теоретическую часть и задания на формирование навыков перевода с английского языка на русский и обратно в англоязычном профессиональном дискурсе.

Для магистрантов 2-го курса, обучающихся по направлению подготовки 45.03.02 «Лингвистика» в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>