

8. Mihranov M.Sh., Migranov A.M., Gusev A.S., Sadykov A.F. Wear of cutting tools with multilayer composite coatings. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 2 (6), pp. 36–41.

9. Mihranov M.Sh., Mihranov A.M., Shehtman S.R. Cutting temperature when using tools with multilayer coating. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 3 (11), pp. 34–43.

Поступила в редакцию/received: 02.06.2022; после рецензирования/revised: 14.06.2022;
принята/accepted: 20.06.2022

УДК 621.914

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ЭФФЕКТОМ АДАПТАЦИИ

М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук, А.М. МИГРАНОВ, науч. сотр.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 127994,
ГСП-4, Москва, Вадковский пер., 1, e-mail: migmars@mail.ru

© Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., 2022

На основе термодинамики неравновесных процессов разработана методология исследования изнашивания режущих инструментов и износостойких покрытий с эффектом прогнозируемой адаптации поверхностей трения. Использование методологии даст возможность оценить самоорганизацию трибосистемы при резании металлов, обеспечит научно обоснованный подход к выбору и применению инструментов и условий резания с прогнозируемыми свойствами самоорганизации при трении. Предложенные принципы выбора и применения инструментальных материалов и износостойких покрытий позволят существенно повысить эффективность лезвийной обработки резанием.

Ключевые слова: пластическая деформация, температура резания, термодинамика неравновесных процессов, трибосистема, самоорганизация, прогнозируемая адаптация, уровень и интервал самоорганизации.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-37-45

ВВЕДЕНИЕ

В процессе резания вследствие изнашивания инструмента происходит непрерывное изменение пространственной формы контактных поверхностей. Это может привести к изменению распределения напряжений и температур в зоне фактического контакта и в целом оказать существенное влияние на интенсивность изнашивания режущего инструмента (даже при обработке без применения смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) и износостойких покрытий с постоянными значениями элементов режима резания). Таким образом, трение контакта и распределение удельных нагрузок и температур являются взаимообусловленными процессами, что необходимо учитывать при разработке методологии исследования изнашивания режущих инструментов и выводе аналитических зависимостей для

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (15), 2022*

расчета интенсивности износа при использовании тех или иных методов интенсификации процесса лезвийной обработки резанием.

Механизм износа режущего инструмента весьма сложен. По существующим представлениям инструмент, в зависимости от условий резания, может подвергаться адгезионному, абразивному, диффузионному, химическому, окислительному и другим видам износа [1–5]. Для расчета диффузионного износа со стороны задней поверхности инструмента может применяться теоретическая формула стойкости, предложенная Т.Н. Лолодзе [3]. И.В. Крагельским получены формулы для расчета интенсивности изнашивания для явлений трения и износа трущихся поверхностей [6]. Ю.Г. Кабалдин рассматривает процесс изнашивания инструмента с позиций структурно-энергетического подхода к прочности твердого тела [5]. Следует, однако, отметить, что определение точных аналитических зависимостей интенсивности изнашивания режущего инструмента, периода стойкости и других показателей обрабатываемости с учетом действий всех видов износа представляет собой сложную задачу. Основу для расчета выходных параметров процесса резания по-прежнему представляет эксперимент, и существуют различные степенные зависимости, которые соответствуют изменению стойкости в зависимости от условий опыта. В большинстве эмпирических формул для расчета интенсивности изнашивания инструмента используются в основном внутренние (температура резания, степень пластической деформации, касательные напряжения, удельные нагрузки и т.д.) и внешние (скорость, подача, глубина резания и т.д.) параметры процесса резания, а также поправочные коэффициенты, учитывающие особенности конкретных условий обработки. В связи с этим различными исследователями предлагаются аналитические зависимости, в определенной степени учитывающие входные параметры процесса резания в рамках конкретных моделей износа инструмента, без учета влияния СОТС, износостойких покрытий и переменности во времени как входных, так и внутренних параметров.

В работах [6–12] установлено, что из всех показателей обрабатываемости резанием на первый план выступает влияние обрабатываемого материала на износ режущего инструмента, характеризуемое уровнями наиболее целесообразных режимов резания и соответствующих им интенсивностей изнашивания.

Несмотря на значительный объем исследований и прогресс в области теории трения и износа, сформулировать общее решение по определению износостойкости режущего инструмента оказывалось невозможным из-за сложности явлений, сопровождающих процесс износа при резании, и наличия большого числа неконтролируемых переменных. Поэтому цель данной работы заключается в разработке такой методологии исследования изнашивания режущих инструментов со свойствами прогнозируемой адаптации при трении, которая позволит раскрыть сложные механизмы приспособляемости поверхностей трения при лезвийной обработке резанием.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Резание металлов по своей физической природе представляет собой сложный процесс [1–3]. На контактных поверхностях режущего инструмента с обрабатываемым материалом возникают большие давления (до 2 000 МПа и более), имеют место высокие скорости деформации (до 10^6 с^{-1}), повышается температура (до 1 200–1 500 К) и т.д. При этом создаются благоприятные условия для развития адгезии, взаимной диффузии, окисления и наводороживания поверхностей, изменения их структурно-фазового состава, генерирования электродвижущей силы (ЭДС). Эти явления

оказывают существенное негативное влияние на состояние и свойства контактных поверхностей инструмента и обрабатываемого материала.

Одним из основных источников тепла и факторов формирования приповерхностных слоев при резании служит трение. Поскольку оно происходит при высокой температуре в условиях ювенильности контакта и наличия пластических деформаций, в адгезионных процессах доминирует адгезионная (молекулярная) составляющая [4].

При относительном скольжении контактирующих поверхностей инструмента и обрабатываемой детали происходит непрерывный процесс возникновения и срезания адгезионных пятен. Поверхность инструмента находится под действием срезающих напряжений, в результате чего частицы материала местами отрываются от поверхности. Обычно такой срыв значительно больше со стороны мягкого материала, но исследования с применением электронной микроскопии [4] показывают, что при этом всегда имеет место и перенос частиц с более твердого материала (инструментального) на более мягкий (обрабатываемый). Вместе с тем для уточнения составляющих энергетического баланса необходимо рассмотреть процессы контактного взаимодействия обрабатываемого материала и поверхностей режущего инструмента.

В этом случае согласно [4, 8, 10–12] при относительном перемещении в точках реального контакта будут происходить следующие явления. Приповерхностные слои более мягкого тела увлекаются силами адгезии и деформируются – вначале упруго, а затем (если величина прочности адгезионных связей на срез τ_n превышает величину пластической постоянной, равную $K = \sigma_T / 2$) получают пластическую деформацию. Деформируясь пластически, эти слои упрочняются (наклепываются), и их предел текучести возрастает до значения σ'_T , соответствующего тому состоянию материала, которое предшествует его разрушению. В дальнейшем возможны следующие варианты:

1) если $\sigma'_T / 2 > \tau_n$, то в определенный момент градиент механических свойств станет положительным и разрыв связи будет происходить по поверхности раздела контактирующих тел;

2) если $\sigma'_T / 2 < \tau_n$, то разрушение будет происходить по более слабому месту на значительной глубине с образованием наливов.

Отсюда следует, что в условиях схватывания (сварки), когда при скольжении деформация и разрушение происходят не на поверхности контакта, напряжения τ_n должны отражать прочность на сдвиг приповерхностного слоя более мягкого из контактирующих тел; при отсутствии схватывания эти напряжения связаны с диссипацией энергии, расходуемой на разрыв образовавшихся при контактировании связей.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ

На основании термодинамической модели изнашивания лезвийных инструментов [9, 10] разработана экспериментально-аналитическая методология исследования оценки эффективности использования инструментов и условий резания с программируемыми свойствами самоорганизации при трении. Структурно-логическая схема этой методологии представлена на рис. 1. В ней предусмотрены следующие основные блоки:

- 1) факторы воздействия на процесс резания;
- 2) изнашивание инструментов;

- 3) исследование прогнозируемой адаптации поверхностей трения (ПАПТ) (самоорганизация в приповерхностных слоях при трении);
- 4) обобщение результатов;
- 5) информационная база данных.

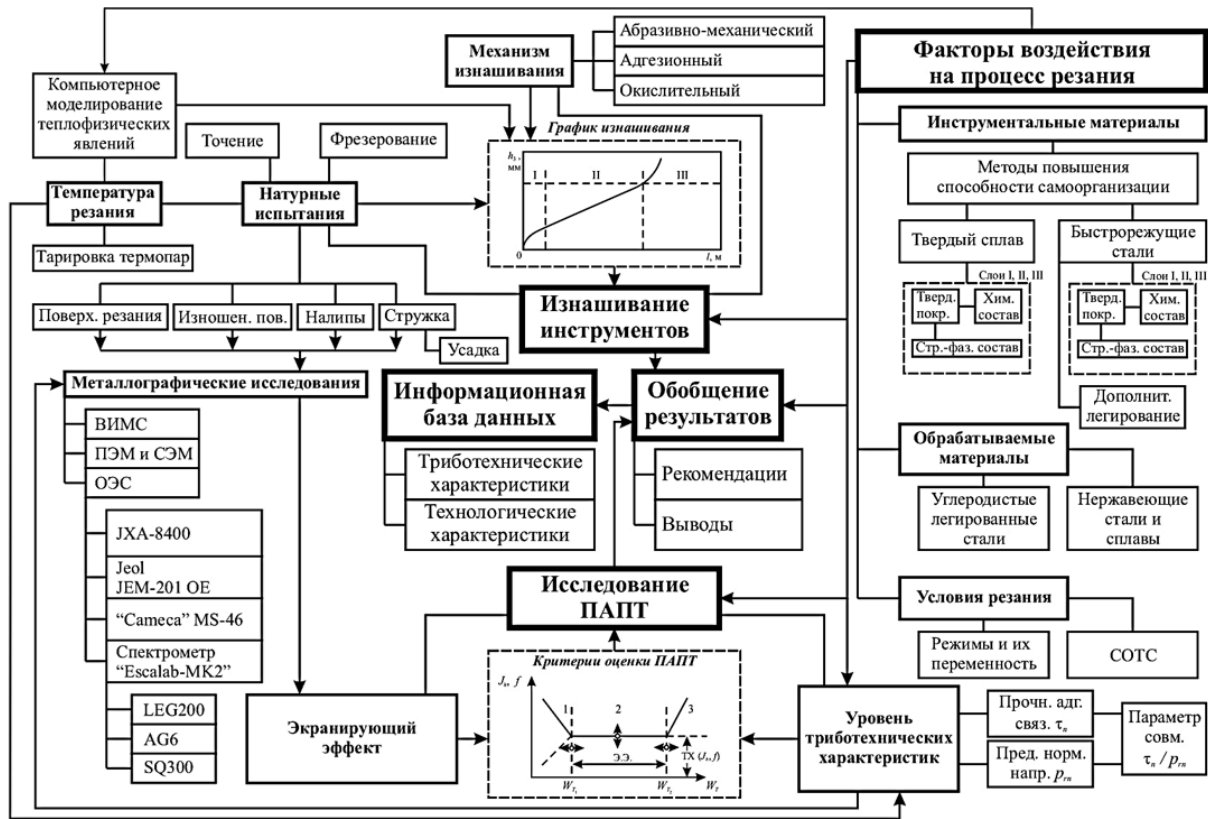


Рис. 1. Структурно-логическая схема методологии исследования изнашивания режущих инструментов с программируемыми свойствами самоорганизации при трении

В качестве факторов воздействия на процесс резания металлов выбраны:

- 1) инструментальные материалы (быстрорежущие стали и твердые сплавы);
- 2) обрабатываемые материалы (углеродистые легированные стали, нержавеющей стали и сплавы);
- 3) условия резания (режимы и их переменность, применение СОТС).

Методами повышения способности самоорганизации выбраны:

- 1) для быстрорежущих сталей – дополнительное легирование и нанесение износостойких покрытий;
- 2) для твердых сплавов – нанесение износостойких покрытий.

В блоке «Изнашивание инструментов» предусматривается проведение натуральных испытаний и компьютерное моделирование теплофизических явлений при точении и фрезеровании в условиях реализации перечисленных выше факторов воздействия на процесс резания металлов. При этом фиксируются результаты численных расчетов при моделировании, графики изнашивания (по пути или времени резания), термоЭДС естественной термопары, коэффициент укорочения стружки; сохраняются фрагменты стружки, поверхности фрикционного контакта под индентором (лунка), изношенной поверхности режущего инструмента и обработанной поверхности.

По результатам тарирования естественных термопар значения термоЭДС переводятся в показатели температуры резания. По заданным параметрам (в основном по скорости резания) гипотетически определяется механизм изнашивания инструмента (абразивно-механический, адгезионный или окислительный).

Принимая во внимание термодинамические концепции, можно разделить весь спектр процессов, протекающих при трении и изнашивании, на две группы:

нормальное изнашивание (области 1, 2 на рис. 2),

катастрофическое изнашивание, уязвимое по повреждениям (область 3 на рис. 2).

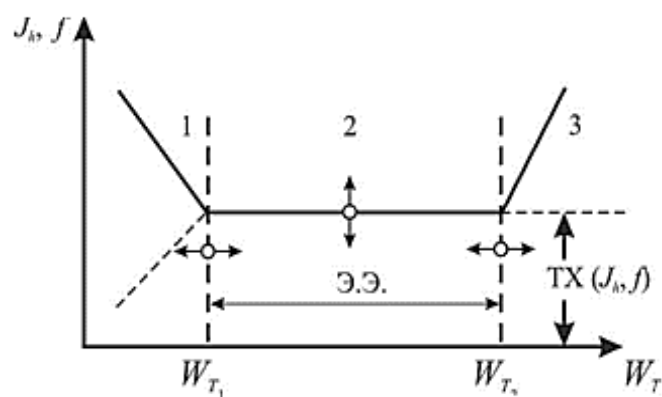


Рис. 2. Изменение показателей ПАПТ фрикционного контакта «инструмент – обрабатываемая деталь» при различных энергиях активации (W_T):
 1 – область неустойчивого процесса; 2 – область самоорганизации;
 3 – область повреждения; TX – триботехнические характеристики;
 ЭЭ – экранирующий эффект

В течение всего периода работы в условиях нормального трения и износа макроскопических разрушений на поверхности трибопары не наблюдается. При этом самоорганизация во время износа происходит благодаря способности трибопары спонтанно организовывать устойчивые упорядоченные структуры, которые защищают (экранируют) основной материал трибопары от непосредственного воздействия контртела. Периодически эти структуры уносятся с частицами износа и создаются вновь.

Результаты процесса ПАПТ можно оценить с помощью таких показателей, как уровень триботехнических характеристик и экранирующий эффект, которые определяют параметры трения и износа. Из этого следует, что контроль за трением и износом осуществляется с целью повышения эффективности ПАПТ (снижения уровня триботехнических характеристик и повышения экранирующего эффекта).

В блоке «Исследование ПАПТ» (самоорганизация) при трении предусматривается оценка уровня триботехнических характеристик и экранирующего эффекта при образовании на фрикционном контакте вторичных фаз. При оценке уровня триботехнических характеристик на одношариковом трибометре (с учетом факторов воздействия на процесс резания и температуру контакта) определяются:

прочность адгезионных связей на срез;

предельные нормальные напряжения в условиях пластической деформации;

параметр совместимости (по существу, молекулярная составляющая коэффициента трения).

Экранирующий эффект (интервал) самоорганизации оценивается результатами металлографических исследований изношенных поверхностей режущих инструментов, прирезочной стороны стружки и поверхности резания, зоны налипов на контактирующих поверхностях инструментов; поверхностей фрикционного контакта в триботехнических исследованиях. Результаты, полученные в блоках «Изнашивание инструментов» и «Исследование ПАПТ», а также информация из блока «Факторы воздействия на процесс резания» (см. рис. 1) поступают в блок «Обобщение результатов», где делаются выводы и разрабатываются рекомендации для научного и практического исследования. Эти выводы и рекомендации поступают в блок «Информационная база данных», в котором хранится информация триботехнического и технологического характера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методология оценки эффективности адаптации трибосистемы при резании металлов позволит обоснованно подойти к выбору и применению инструментов и условий резания с прогнозируемыми свойствами самоорганизации при трении. Предложенные принципы выбора и применения инструментальных материалов и износостойких покрытий на основе результатов исследования вторичных структур на трущихся поверхностях могут использоваться для обеспечения как можно более полного интенсивного и раннего прохождения неравновесных процессов, в том числе самоорганизации на трущихся поверхностях, которая позволит существенно повысить эффективность обработки резанием. При этом для уменьшения интенсивности изнашивания режущих инструментов необходимо, чтобы дополнительные источники производства энтропии (СОТС, переменность элементов режима резания и др.) способствовали протеканию неравновесных процессов образования вторичных структур на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемая деталь».

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизация в процессах трения и смазки при резании // *Вестник машиностроения*. 2003. № 10. С. 53–59.
2. Булгаревич С.Б. Термодинамические характеристики несамопроизвольных химических реакций, инициируемых трением // *Сборник трудов III Международного семинара «Контактное взаимодействие и сухое трение»*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. С. 60–67.
3. Гершман И.С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих контактов. Дис... докт. техн. наук. Москва. 2006. 234 с.
4. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
5. Криони Н.К., Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р. Наноструктурированные вакуумные ионно-плазменные покрытия. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 367 с.

6. Семенов А.Б., Игнатова Е.В., Семенов Б.И., Романова В.С., Салибеков С.Е. Диссипативные процессы и структурные изменения материала диска в трибосистеме алюминоматричный композит – контртело // *Технология металлов*. 2006. № 3. С. 26–33.

7. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 2 (98). С. 18–32.

8. Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш., Чертовских С.В., Садыкова А.Я. Триботехнические характеристики титана с ультрамелкозернистой структурой // *Трение и износ*. 2005. Т. 26. № 2. С. 208–214.

9. Vereschaka A., Grigoriev S., Milovich F., Sitnikov N., Migranov M., Andreev N., Bublikov Yu., Sotova C. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr, Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating // *Tribology International*. 2021. V. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20306290> (дата обращения: 17.12.2021).

10. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological properties of multilayer coatings for cutting tool // *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. № 3. P. 245–250.

11. Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Садыков А.Ф., Хусаенов И.И. Моделирование теплофизических явлений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 3 (7). С. 13–21.

12. Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Колосова Н.В., Ахметова Э.З. Инновационные материалы и покрытия с эффектом адаптации при резании металлов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 37–43.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Мигранов А.М. Комплексная оценка изнашивания режущих инструментов и композиционных покрытий с эффектом адаптации // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 37–45.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was supported by RSF (project No 22-19-00670, <https://rscf.ru/project/22-19-00670/>)

INTEGRATED ASSESSMENT OF WEAR OF CUTTING TOOLS AND COMPOSITE COATINGS WITH THE EFFECT OF ADAPTATION

M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc., A.M. MIGRANOV, Researcher

Moscow State University of Technology «STANKIN», 3a, Vadkovsky lane,
127055, Moscow, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

In the work on the basis of thermodynamics of nonequilibrium processes the methodology of research of wear of cutting tools and wear-resistant coatings with effect of predictable adaptation of friction surfaces is developed. The use of the methodology will

make it possible to evaluate the self-organization of the tribosystem during metal cutting, will provide a scientifically validated approach to the selection and application of tools and cutting conditions with predictable properties of self-organization during friction. The proposed principles of selection and application of tool materials and wear-resistant coatings will significantly improve the efficiency of blade cutting machining.

Keywords: plastic deformation, cutting temperature, thermodynamics of nonequilibrium processes, tribosystem, self-organization, predictable adaptation, level and interval of self-organization.

REFERENCES

1. Kabaldin Y.G. Self-organization in friction and lubrication processes at cutting. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2003. No 10, pp. 53–59.
2. Bulgarevich S.B. Thermodynamic Characteristics of Non-Self-Organized Chemical Reactions initiated by Friction. *Sbornik trudov III Mezhdunarodnogo ceminara «Kontaktnoye vzaimodeystviye i sukhoye treniye»*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2005, pp. 60–67.
3. Gershman I.S. Development of wear-resistant materials by methods of nonequilibrium thermodynamics on an example of sliding contacts. Doct. Diss. (Engineering). Moscow. 2006. 234 c.
4. Mihranov M.Sh., Shuster L.Sh. Intensifikatsiya protsessa metalloobrabotki na osnove ispolzovaniya effekta samoorganizatsii pri trenii [Intensification of metal-working process by means of friction self-organization effect]. Moscow: Mashinostroenie, 2005. 202 p.
5. Krioni N.K., Mihranov M.Sh., Shehtman S.R. Nanostrukturirovannyye vakuumnyye ionno-plazmennyye pokrytiya [Nanostructured vacuum ion-plasma coatings]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017. 367 p.
6. Semenov A.B., Ignatova E.V., Semenov B.I., Romanova V.S., Salibekov S.E. Dissipative processes and structural changes of disk material in the tribosystem alum matrix composite – counterbody. *Tekhnologiya metallov*. 2006. No 3, pp. 26–33.
7. Vereshchaka A.S., Grigoryev S.N., Tabakov V.P. Methodological principles of creating functional coatings for cutting tools. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*. 2013. No 2 (98), pp. 18–32.
8. Shuster L.Sh., Migranov M.Sh., Chertovskikh S.V., Sadykova A.Y. Tribotechnical characteristics of titanium with ultrafine grained structure. *Friction and wear*. 2005. V. 26. No 2, pp. 208–214.
9. Vereschaka A., Grigoriev S., Milovich F., Sitnikov N., Migranov M., Andreev N., Bublikov Yu., Sotova C. Investigation of tribological and functional properties of Cr,Mo-(Cr,Mo)N-(Cr,Mo,Al)N multilayer composite coating. *Tribology International*. 2021. V. 155. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20306290> (date accessed: 17.12.2021).
10. Migranov M.S., Migranov A.M., Minigaleev S.M., Shehtman S.R. Tribological properties of multilayer coatings for cutting tools. *Journal of Friction and Wear*. 2018. V. 39. No 3, pp. 245–250.
11. Migranov M.Sh., Migranov A.M., Sadykov A.F., Khusaenov I.I. Modeling of thermophysical phenomena. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2020. No 3 (7), pp. 13–21.

12. Migranov A.M., Migranov M.S., Kolosova N.V., Akhmetova E.Z. Innovative materials and coatings with the effect of adaptation in metal cutting. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 4 (12), pp. 37–43.

Поступила в редакцию/received: 02.06.2022; после рецензирования/revised: 14.06.2022;
принята/accepted: 20.06.2022

УДК 621.941

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПЕРЕУСТАНОВКА ТОНКОСТЕННОЙ ЗАГОТОВКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

© Архаров А.П., 2022

Проведен анализ известных способов автоматической переустановки тонкостенных заготовок. Выявлены их достоинства и недостатки. Раскрыты сущность и реализация разработанного способа переустановки тонкостенной втулки. Проведено его сравнение по существенным признакам с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность способа и достигаемый технический результат.

Ключевые слова: автоматизация, переустановка, способ, заготовка, закрепление, патрон, точность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-45-49

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении при изготовлении деталей в виде тел вращения используют токарные обрабатывающие центры с числовым программным управлением (ЧПУ) с двумя шпинделями: основным и протившпинделем. В процессе обработки на таких станках возникает необходимость переустановки заготовок с одного шпинделя на другой. Для этой цели используют трехкулачковые самоцентрирующие механизированные патроны [1]. При переустановке производят закрепление заготовки патроном протившпинделя, при этом заготовка остается закрепленной в патроне основного шпинделя. Поэтому отклонение исходной формы поверхности, за которую выполняется закрепление, а также отклонение ее расположения относительно рабочей поверхности зажимных кулачков приводит к деформации заготовки. При переустановке тонкостенных заготовок, например в виде втулок, к упомянутому фактору добавляется искажение их исходной формы в поперечном сечении от действия сил закрепления. Однако использование трехкулачковых самоцентрирующих патронов не устраняет влияние этих факторов на точность установки.

Известен способ установки заготовки наружной поверхностью вращения и перпендикулярной к ее оси плоской поверхностью, осуществляемый с помощью