

Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.П., Илюшкин М.В., Титов Ю.А., Сагитов Д.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния штампового инструмента с износостойким покрытием на разделительных операциях листовой штамповки с использованием программного пакета LS-DYNA // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 5–11. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.01

O.I. Morozov, V.P. Tabakov, V.N. Kokorin, M.V. Ilyushkin, Yu.A. Titov, D.I. Sagitov Modeling the stress-strain state of a stamping tool with a wear-resistant coating on sheet metal stamping separation operations using the LS-DYNA software package. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 5–11. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.01

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 3, 2020
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.01
УДК 621.9.025

О.И. Морозов¹, В.П. Табаков¹, В.Н. Кокорин¹, М.В. Илюшкин³, Ю.А. Титов¹, Д.И. Сагитов²

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

²Ульяновский институт гражданской авиации
им. гл. маршала авиации Б.П. Бугаева, Ульяновск, Россия

³АО «Ульяновский НИАТ», Ульяновск, Россия

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ
НА РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА LS-DYNA**

Рассмотрен процесс моделирования в программном пакете Ansys LS-DYNA напряженно-деформированного состояния рабочей зоны деформации на разделительных операциях листовой штамповки с использованием инструмента с износостойким ионно-плазменным покрытием. Объектом исследования выступает рабочий инструмент (пуансоны и матрицы) штамповой оснастки для процессов листовой штамповки с износостойким покрытием на основе нитрида титана, нанесенного методами ионно-плазменного напыления и катодно-ионной очистки. Целью исследования являлось определение влияния износостойкого покрытия, нанесенного на рабочую кромку штампового инструмента, на напряженно-деформированное состояние в зоне деформации. В рамках исследования были предложены физические и математические модели процессов вырубки с использованием программных пакетов и произведены оценка и анализ напряженного состояния материалов инструмента в рабочей зоне деформации. В процессе моделирования был использован метод конечно-элементного моделирования динамических взаимодействий твердых тел в программном пакете Ansys LS-DYNA. Были получены следующие результаты: построены математические модели процессов вырубки листового материала (модели пуансона, матрицы и заготовки), произведен переход от 3D-моделей к упрощенным соосным симметричным моделям, позволяющим оценить напряженно-деформированное состояние в рабочей зоне по отдельным сечениям; построены модели процессов вырубки с инструментом разного типа (с износостойким покрытием и без покрытия), получены визуальные интерпретации распределения полей напряжений в материале инструмента, построены графики напряжений и потенциальной энергии в элементах поверхностного слоя в критических точках контакта на характерных этапах процесса вырубки листового материала.

Ключевые слова: штамп, пуансон, матрица, покрытие, износостойкость, математическая модель, LS-DYNA, конечно-элементная сетка, напряженно-деформированное состояние, нитрид титана, ресурсоёмкость.

O.I. Morozov¹, V.P. Tabakov¹, V.N. Kokorin¹, M.V. Ilyushkin³, Yu.A. Titov¹, D.I. Sagitov²

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation

²Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after the Chief
Marshal of Aviation B.P. Bugaev, Ulyanovsk, Russian Federation

³PC "Ulyanovsk NIAT", Ulyanovsk, Russian Federation

**MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF A STAMPING TOOL
WITH A WEAR-RESISTANT COATING ON SHEET METAL STAMPING SEPARATION
OPERATIONS USING THE LS-DYNA SOFTWARE PACKAGE**

This study examined the modeling process in the Ansys LS-DYNA software package of the stress-strain state of the working zone of deformation in sheet metal stamping separation operations using a tool with a wear-resistant ion-plasma coating. The object of the study is a working tool (punches and dies) of die tooling for sheet metal stamping processes with a wear-resistant coating based on titanium nitride deposited by ion-plasma spraying and cathodic-ion cleaning methods. The aim of the study was to determine the effect of a wear-resistant coating applied to the working

edge of the stamping tool on the stress-strain state in the deformation zone. As part of the study, physical and mathematical models of cutting processes using software packages were proposed, and the stress state of the tool materials in the deformation working zone was evaluated and analyzed. In the modeling process, the finite element simulation of dynamic interactions of solids was used in the Ansys LS-DYNA software package. The following results were obtained: mathematical models of the processes of cutting down the sheet material were constructed (models of the punch, matrix and blanks), a transition was made from 3D-models to simplified coaxial symmetric models that allow one to evaluate the stress-strain state in the working area by separate sections, models of the processes of cutting with different types of tools (with wear-resistant coating and without coating), visual interpretations of the distribution of stress fields in the tool material are obtained, stress graphs are constructed eny and potential energy in the cell surface layer at the critical points of contact on the characteristic process steps of sheet material cutting.

Keywords: stamp, punch, matrix, coating, wear resistance, mathematical model, LS-DYNA, finite element mesh, stress-strain state, titanium nitride, resource intensity.

В современном машиностроении большое значение имеет стойкость инструментальной оснастки, ее износостойкость и ресурс рабочей поверхности. Одним из факторов, влияющих на износ рабочей поверхности штампового инструмента, является напряженно-деформированное состояние инструментального материала в зоне деформации.

Рабочие поверхности штампового инструмента (пуансонов и матриц) работают в специфических условиях: ударные нагрузки, высокие значения коэффициентов трения, что в совокупности обуславливает существенное снижение эксплуатационного ресурса пуансонов и матриц, а также образование неоднородных схем напряженно-деформированного состояния. В Ульяновском государственном техническом университете на кафедрах «Материаловедение и обработка металлов давлением» и «Инновационные технологии в машиностроении» совместно с АО «Ульяновский НИАТ» и АО «Ульяновский патронный завод» проводятся исследования технологии повышения стойкости штампового инструмента с использованием износостойких покрытий, наносимых методами ионно-плазменного напыления [1–10].

Одним из инструментов для изучения особенностей НДС является построение математических моделей с использованием программных средств, позволяющих производить анализ и прогнозирование развития НДС в исследуемой зоне (зоне контакта рабочих поверхностей инструмента и материала заготовки). Сотрудниками кафедр «Материаловедение и обработка металлов давлением» и «Инновационные технологии в машиностроении» совместно с предприятием АО «Ульяновский НИАТ» с целью определения влияния износостойкого покрытия на основе нитрида титана на напряженно-деформированное состояние рабочей зоны инструмента были проведены исследования по построению математической модели процесса вырубki. Для построения математической модели был выбран метод конечных элементов, реализованный в программном пакете Ansys LS-DYNA. LS-DYNA – это многоцелевая программа, предназначенная для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Программа использует следующие методы: дискретные методы, бессеточные методы [11–17].

Моделирование процесса вырубki осуществлялось поэтапно в следующей последовательности:

- построение исходных моделей процессов вырубki-пробивки (оценка НДС);
- построение моделей инструмента с износостойким покрытием (оценка НДС);
- сравнение НДС моделей без нанесенного износостойкого покрытия и с нанесенным на инструмент износостойким покрытием на основе нитрида титана.

На первом этапе была построена конечно-элементная модель процесса вырубki со следующими параметрами: диаметр пуансона 10 мм, диаметр отверстия в матрице 10,05 мм, толщина вырубкаемой заготовки 1 мм, межинструментальный зазор 0,05 мм, материал инструмента – инструментальная сталь (сталь марки X12M), материал заготовки – алюминиевый сплав Д16 (рис. 1). В программе LS-DYNA были заданы следующие параметры процесса вырубki: тип материала – упругопластический, размер конечно-элементной сетки – (0,01×0,01) мм. При задании параметров материала инструмента использовался тип материала инструмента без учета разрушения; пластический тип материала вырубкаемой заготовки; применялись справочные и экспериментальные данные, полученные на предыдущем этапе НИР, – кривые течения материала, результаты испытаний на растяжение, модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.

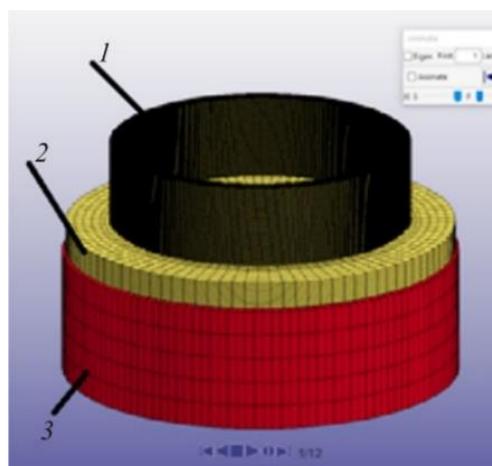


Рис. 1. Конечно-элементная 3D-модель процесса вырубki: 1 – пуансон (упрощенная модель); 2 – заготовка; 3 – матрица

Представленная модель позволяет оценить НДС рабочей зоны, однако вследствие наличия большого количества расчетных элементов и наложенных ограничений требует длительного времени для расчетов (около двух суток) и является достаточно сложной для последующей модификации и корректировки. В то же время из-за большого размера ячеек конечно-элементной сетки данная модель не позволяет с достаточной степенью точности определить НДС в отдельных участках рабочей зоны – размер ячеек сетки превышает толщину покрытия на два порядка, поэтому для уменьшения времени расчета при одновременном уменьшении размеров ячеек конечно-элементной сетки был осуществлен переход к построению двухмерной модели в сечении и наложены соответствующие ограничения (рис. 2). Согласно данным справочной литературы [16, 17], данный переход позволяет повысить точность получаемых значений НДС в области рабочей зоны без повышения времени расчета.

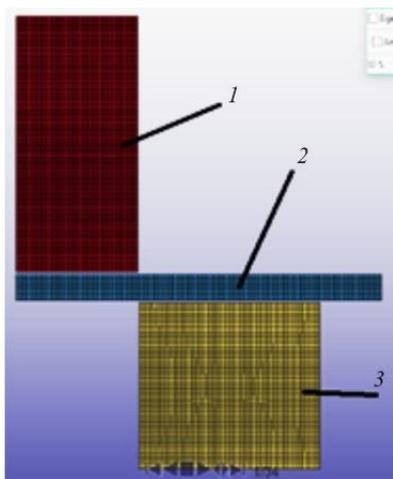


Рис. 2. 2D-модель процесса вырубki:
1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – матрица

Оптимизированная модель позволяет уменьшить размер ячеек конечно-элементной сетки до значений 0,030 мм, а модель, выполненная в виде сечения, позволяет без внесения большого числа изменений преобразовывать данную модель под конкретные операции и габаритные размеры инструмента, определить НДС в отдельном сечении и распределение полей напряжений и деформаций на протяжении всего процесса штамповки с достаточно высокой точностью (в элементах размером 30×30 мкм) (рис. 3), что позволяет предугадывать образование критических зон и износ инструмента. На рис. 3, а, иллюстрирующем напряженно-деформированное состояние в рабочей зоне деформиро-

вания, градацией желтого и красного цветов показаны поля напряжений (по Мизесу) в начале процесса вырубki. Необходимо отметить, что данная модель при необходимости преобразуется в 3D-модель путем поворота вокруг центральной оси на заданный угол и позволяет рассчитывать поля напряжений по трем осям координат, однако в таком случае время расчета увеличивается значительно.

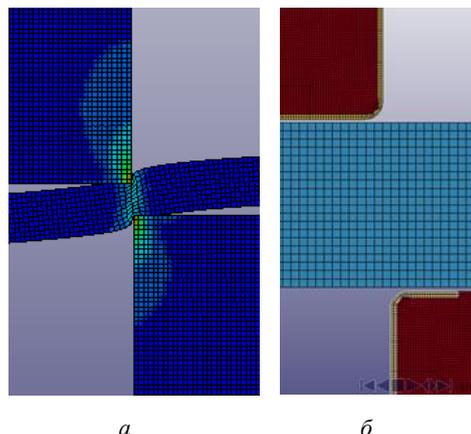


Рис. 3. Модифицированная 2D-модель процесса вырубki: а – визуальное отображение полей напряжений в процессе вырубki; б – модель, модифицированная с учетом износостойкого покрытия

На следующем этапе разработанная модель была скорректирована с учетом наличия износостойкого покрытия на основе нитрида титана толщиной около 30 мкм (см. рис. 3, б). Для этого часть конечно-элементной сетки заданной толщины была отделена от основного материала модели и к ней были приложены следующие параметры и ограничения: тип материала – хрупкий, вид контакта с инструментальной основой – абсолютный, модуль упругости – 300 ГПа. Параметры материала брались из справочной литературы, а также по результатам испытаний режущего инструмента с покрытием, проводимым на кафедре «Инновационные технологии в машиностроении» УлГТУ [1–10, 18, 19]. После добавления в модель износостойкого покрытия для увеличения точности расчета на рабочей кромке был добавлен искусственный радиус скругления $R = 0,010$ мкм, что обеспечило [19–25] приближение модели к реальному процессу и предотвратило искажение показаний модели в результате возможного появления концентратора напряжений.

На рис. 4 представлено напряженно-деформированное состояние рабочей зоны в процессе вырубki (32-й шаг расчета из 110) – инструмент без покрытия демонстрирует более высокие и неравномерные значения поля напряжений.

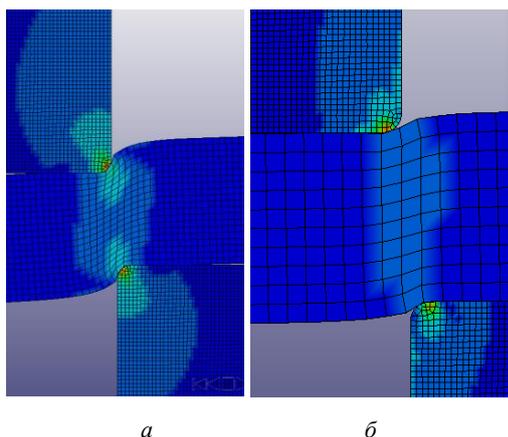


Рис. 4. НДС рабочей зоны инструмента в процессе вырубки: *а* – без износостойкого покрытия; *б* – с износостойким покрытием

На рис. 5 представлены графики изменения напряженно-деформированного состояния в угловом элементе пуансона (в зоне очага деформации) на всем протяжении процесса вырубki (для инструмента без покрытия значение пиковых напряжений в элементе габаритными размерами 30×30 мкм составляет 2,2 ГПа, для упрочненного инструмента – не превышает 1,7 ГПа).

Как видно из графических зависимостей и визуальной интерпретации поля напряжений, представленных на рис. 4 и 5, при использовании износостойкого покрытия наблюдается снижение пиков напряжений и сглаживание НДС в рабочей зоне (площадь поля напряжений уменьшается 1,5–2 раза, пиковые значения напряжений снижаются на 20 %).

Этот эффект объясняется снижением контактного трения и изменением характера взаимодействия рабочей поверхности инструмента и листовой заготовки под влиянием износостойкого покрытия, в том числе изменением физико-механических характеристик поверхностного слоя, которые происходят в процессе нанесения износостойкого покрытия.

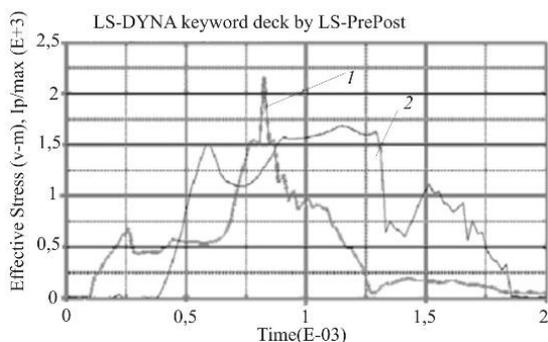


Рис. 5. Графики изменения напряжения в угловом элементе на поверхности рабочей кромки пуансона: *1* – инструмент с покрытием нитрид титана; *2* – инструмент без покрытия

На основании анализа поведения математической модели и полученных графических зависимостей было установлено, что с использованием износостойкого покрытия НДС в зоне деформации в процессе вырубki изменяется благоприятным образом, полученные модели напряженно-деформированного состояния в рабочей зоне деформации могут позволить как варьировать схемой НДС, тем самым обеспечивая благоприятные условия нагружения, так и способствовать реализации более «мягких» схем нагружения, тем самым снижая уровень растягивающих напряжений в поверхностном слое инструмента, увеличивая адгезионную способность, а следовательно, и износостойкость покрытия. Сделан вывод, что данные модели могут позволить прогнозировать возможные области износа рабочей поверхности инструмента, а следовательно, более точно определять необходимость поверхностного упрочнения конкретных локальных областей, снижая затраты на производственный процесс.

Список литературы

1. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
2. Хван А.Д., Хван Д.В., Осинцев А.И. Повышение стойкости инструментальной стали X12M // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 8, № 5. – С. 131–134.
3. Табаков В.П., Чихранов А.В. Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 292–297.
4. Згалат-Лозинский О.Б., Рагуля А.В., Дуб Н.В. Свойства нанокристаллических материалов на основе нитрида титана // Наноструктурное материаловедение. – 2010. – № 1. – С. 30–38.
5. Моделирование процесса интенсивной деформации в роликах с использованием программного пакета Ansys LS-DYNA / О.И. Морозов, М.В. Илюшкин, В.П. Табаков, В.Н. Кокорин, В.В. Марковцева, Ю.Н. Гаврилина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 12 (144). – С. 43–47.
6. Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и пресс-форм из теплостойких сталей / О.И. Морозов, В.П. Табаков, В.Н. Кокорин, Ю.А. Титов // Известия Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2017. – Вып. 11, ч. 1. – С. 64–68.
7. Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов при использовании комплексной модификации / О.И. Морозов, В.Н. Кокорин, В.П. Табаков, Д.И. Сагитов, М.В. Илюшкин, Н.А. Ширманов // Известия Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 317–326.
8. Физическая модель структурирования системы «подложка-покрытие» в процессах комплексного модифицирования поверхностного слоя рабочих частей штампов и пресс-форм / О.И. Морозов, В.Н. Кокорин, В.П. Табаков, Д.И. Сагитов, М.В. Илюшкин, Н.А. Ширманов //

Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2018. – № 11 (89). – С. 35–41.

9. Исследование процесса комплексной модификации поверхностного слоя рабочих деталей штампов и пресс-форм, работающих в условиях повышенного износа / О.И. Морозов, В.Н. Кокорин, В.П. Табаков, Д.И. Сагитов, М.В. Илюшкин, Н.А. Ширманов // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ-2018): материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию ИМАШ РАН, г. Москва, 4–6 декабря 2018 г. / Ин-т комп. исслед. – М.; Ижевск, 2018. – С. 181–183.

10. Физическая модель механической активации поверхностного слоя металлов и сплавов в процессе одноосного сжатия / О.И. Морозов, В.Н. Кокорин, В.П. Табаков, Д.И. Сагитов, М.В. Илюшкин, Н.А. Ширманов // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ-2018): материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию ИМАШ РАН, г. Москва, 4–6 декабря 2018 г. / Ин-т комп. исслед. – М.; Ижевск, 2018. – С. 183–184.

11. Чернявский А.О. Метод конечных элементов. Основы практического применения: монография. – М.: Машиностроение, 2003. – 24 с.

12. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. Ansys в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

13. Чигарев А.В., Кравчук, А.С., Смалюк А.Ф. Ansys для инженеров: справ. пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

14. Курненок А.В., Шурыгин А.Ю. Численное моделирование процессов резания: учеб. пособие / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2017. – Ч. 1. – 184 с.

15. LS-DYNA analysis for structural mechanics. Predictive engineering / LSTC Livermore Software Technology Corp. – Livermore, 2014. – 115 p.

16. Криворучко Д.В., Залого В.О., Корбач В.Г. Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом конечных элементов: учеб. пособие. – Сумы: Изд-во СумДУ, 2009. – 208 с.

17. Илюшкин М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением (осадка цилиндрической заготовки): учеб.-метод. пособие. – Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2013. – 112 с.

18. Повышение стойкости штампового инструмента с износостойким покрытием на формоизменяющих операциях / В.П. Табаков, В.Н. Кокорин, Е.Л. Корняков, О.И. Морозов, А.С. Алешин, Д.И. Сагитов // Известия Тул. гос. ун-та. Технические науки. – 2020. – № 6. – С. 352–358.

19. Физическая модель структурирования в процессах комплексного модифицирования поверхностного слоя рабочих частей штампов и пресс-форм / О.И. Морозов, Н.В. Мишов, Н.П. Шиллер, А.М. Бузыцкий // МИКМУС-2018: материалы XXX Междунар. инновац. конф. молодых ученых и студентов, г. Москва, 20–23 ноября 2018 г. – М., 2019. – С. 39–41.

20. Tobias Erhart Review of solid element formulation in LS-DYNA // LS-DYNA Forum 2011, Stuttgart, Germany, 12 October 2011. – Stuttgart, Germany, 2011. – P. 36.

21. Haufe A., Schweizerhot K., Du Bois P. Review of shell element formulations // Developer Forum, Filderstand, Germany, 24 September 2013. – Filderstand, Germany, 2013. – P. 35.

22. Maresca G., Milella P.P., Pino G. A critical review of triaxiality based failure criteria. – ANPA – Via V. Brancati, Roma, 1997.

23. Bradley N. Maker, Xinhai Zhu Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA / LSTC. – 2000. – 12 p.

24. Муйземнек А.Ю. Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа: учеб. пособие / ИИЦ ПГУ. – Пенза, 2005. – 152 с.

25. Смирнов-Аляев Г.А. Сопrotивление материалов пластическим деформациям. Краткие основы. – М.: Л.: Машгиз, 1949. – 248 с.

References

1. Tabakov V.P. Formirovanie iznosostoikikh ionno-plazmennyykh pokrytii rezhushchego instrumenta [Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting tools]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 311 p.

2. Khvan A.D., Khvan D.V., Osintsev A.I. Povyshenie stoikosti instrumental'noi stali Kh12Mo [Increasing the resistance of Xr12Mo tool steel]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no. 5, pp. 131-134.

3. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Opredelenie mekhanicheskikh kharakteristik iznosostoikikh ionno-plazmennyykh pokrytii na osnove nitrida titana [Determination of mechanical characteristics of wear-resistant titanium nitride-based ion-plasma coatings]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2010, vol.12, no. 4, pp. 292-297.

4. Zgalat-Lozinskii O.B., Ragulia A.V., Dub N.V. Svoistva nanokristallicheskikh materialov na osnove nitrida titana [Properties of nanocrystalline materials based on titanium nitride]. *Nanostruktornoe materialovedenie*, 2010, no. 1, pp. 30-38.

5. Morozov O.I., Iiushkin M.V., Tabakov V.P., Kokorin V.N., Markovtseva V.V., Gavrilina Iu.N. Modelirovanie protsesssa intensivnoi deformatsii v rol'nikakh s ispol'zovaniem programmnoho paketa Ansys LS-Dyna [Simulation of the intensive deformation process in rollers using the Ansys LS-DYNA software package]. *Uprochniiaushchie tekhnologii i pokrytiia*, 2016, no.12 (144), pp. 43–47

6. Morozov O.I., Tabakov V.P., Kokorin V.N., Titov Iu.A. Povyshenie stoikosti rabochikh poverkhnostei detalei shtampov i press-form iz teplostoikikh stalei [Increased resistance of working surfaces of dies and molds made of heat-resistant steels]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, iss.11, pach 1, 64-68 p.

7. Morozov O.I., Kokorin V.N., Tabakov V.P., Sagitov D.I., Iiushkin M.V., Shirmanov N.A. Povyshenie stoikosti rabochikh poverkhnostei detalei shtampov pri ispol'zovanii kompleksnoi modifikatsii [Increase of durability of working surfaces of dies details at use of complex modification]. *Izvestiia tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, iss. 8, 320 p.

8. Morozov O.I., Kokorin V.N., Tabakov V.P., Sagitov D.I., Iliushkin M.V., Shirmanov N.A. Fizicheskaiia model' strukturirovaniia sistemy «podlozhka-pokrytie» v protsessakh kompleksnogo modifitsirovaniia poverkhnostnogo sloia rabochikh chastei shtampov i press-form [Physical model of "substrate-coating" system structuring in the processes of complex modification of the surface layer of working parts of dies and molds]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2018, no. 11 (89), pp. 35–41.

9. Morozov O.I., Kokorin V.N., Tabakov V.P., Sagitov D.I., Iliushkin M.V., Shirmanov N.A. Issledovanie protsessa kompleksnoi modifikatsii poverkhnostnogo sloia rabochikh detalei shtampov i press-form, rabotaiushchikh v usloviakh povyshennogo iznosa [Investigation of the process of complex modification of the surface layer of working parts of dies and molds operating under conditions of increased wear]. *Nauchnye trudy 4-oi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 80-letiiu IMASH RAN, «Zhivuchest' i konstruktсионnoe materialovedenie» (ZhivKoM–2018)*. Moscow: Izhevsk: Institut komp'uternykh issledovaniia, 2018, pp. 181–183.

10. Morozov O.I., Kokorin V.N., Tabakov V.P., Sagitov D.I., Iliushkin M.V., Shirmanov N.A. Fizicheskaiia model' mekhanicheskoi aktivatsii poverkhnostnogo sloia metallov i splavov v protsesse odnoosnogo szhatiia [Physical model of mechanical activation of the surface layer of metals and alloys during uniaxial compression]. *Nauchnye trudy 4-oi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 80-letiiu IMASH RAN, «Zhivuchest' i konstruktсионnoe materialovedenie» (ZhivKoM–2018)*. Moscow: Izhevsk: Institut komp'uternykh issledovaniia, 2018, pp. 183–184.

11. Cherniavskii A.O. Metod konechnykh elementov. Osnovy prakticheskogo primeneniia: monografiia [Finite element method. Basics of practical application: monograph]. A.O. Cherniavskii. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 24 p.

12. Ansys v rukakh inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo [Ansys in the hands of an engineer: Practical manual]. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. Moscow: Editort URSS, 2003, 272 p.

13. Ansys dlia inzhenerov: Spravochnoe posobie [Ansys for engineers]. Chigarev A.V., Kravchuk, A.S., Smaliuk A.F. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 512 p.

14. Kurnenkov A.V. Chislennoe modelirovanie protsessov rezaniiu: uchebnoe posobie [Numerical simulation of cutting processes]. A.V. Kurnenkov, A.Iu. Shurygin. Nizhnii Novgorod, 2017, 184 p.

15. LS-DYNA analysis for structural mechanics. Predictive engineering. LSTC Livermore Software Technology Corp., 2014, 115 p.

16. Krivoruchko D.V. Osnovy 3D-modelirovaniia protsessov mekhanicheskoi obrabotki metodom konechnykh elementov: uchebnoe posobie [Basics of 3D modeling of machining processes by finite element method]. Izdatel'stvo SumDU, 2009, 208 p.

17. Iliushkin M.V. Modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem (osadka tsilindricheskoi zagotovki): uchebno-metodicheskoe posobie [Modeling of metal working processes by pressure (sludge of cylindrical billet)]. Ul'ianovsk: UIGU, 2013, 112 p.

18. Morozov O.I., Kokorin V.N., Tabakov V.P., Sagitov D.I., Iliushkin M.V., Shirmanov N.A. Povyshenie

stoikosti rabochikh poverkhnostei detalei shtampov pri ispol'zovanii kompleksnoi modifikatsii [Increase the durability of stamping tools with wear-resistant coating on forming operations]. *Izvestiia tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, iss. 8, 320 p.

19. Morozov O.I., Kokorin V.N., Tabakov V.P., Sagitov D.I., Iliushkin M.V., Shirmanov N.A. Fizicheskaiia model' strukturirovaniia sistemy «podlozhka-pokrytie» v protsessakh kompleksnogo modifitsirovaniia poverkhnostnogo sloia rabochikh chastei shtampov i press-form [Physical model of structuring in the processes of complex modification of the surface layer of working parts of dies and molds]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2018, no. 11 (89), pp. 35–41.

20. Tobias Erhart Review of solid element formulation in LS-DYNA. *LS-DYNA Forum 2011, Stuttgart, Germany, 12 October 2011*. Stuttgart, Germany, 2011, pp. 36.

21. Haufe A., Schweizerhot K., Du Bois P. Review of shell element formulations. *Developer Forum, Filderstand, Germany, 24 September 2013*. Filderstand, Germany, 2013, pp. 35.

22. Maresca G., Milella P.P., Pino G. A critical review of triaxiality based failure criteria. ANPA – Via V. Brancati, Roma, 1997.

23. Bradley N. Maker, Xinhai Zhu Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA. LSTC, 2000, 12 p.

24. Muizemnek A.Iu. Opisaniie povedeniia materialov v sistemakh avtomatizirovannogo inzhenernogo analiza: uchebnoe posobie [Description of material behavior in automated engineering analysis systems]. Penza: IITs PGU, 2005, 152 p.

25. Smirnov-Aliaev G.A. Soprotivlenie materialov plasticheskim deformatsiiam. Kratkie osnovy [Resistance of materials to plastic deformations. Brief basics]. Moscow: Mashgiz, 1949, 248 p.

Получено 28.05.2020

Опубликовано 12.10.2020

Сведения об авторах

Морозов Олег Игоревич (Ульяновск, Россия) – старший преподаватель кафедры материаловедения и обработки металлов давлением Ульяновского государственного технического университета, e-mail: olmorozov-rabota@yandex.ru.

Кокорин Валерий Николаевич (Ульяновск, Россия) – доктор технических наук, профессор, завкафедрой материаловедения и обработки металлов давлением Ульяновского государственного технического университета, e-mail: vnkokorin@mail.ru.

Табакон Владимир Петрович (Ульяновск, Россия) – доктор технических наук, профессор, завкафедрой инновационных технологий в машиностроении Ульяновского государственного технического университета, e-mail: vpt1947@mail.ru.

Сагитов Дамир Ильдарович (Ульяновск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры авиационной техники, замдекана факультета летной эксплуатации и управления воздушным движением Ульяновского института гражданской авиации им. гл. маршала авиации Б.П. Бугаева, e-mail: sagdam@mail.ru.

Титов Юрий Алексеевич (Ульяновск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и обработки металлов давлением, замдекана машиностроительного факультета Ульяновского государственного технического университета, e-mail: tya@ilstu.ru.

Илюшкин Максим Валерьевич (Ульяновск, Россия) – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по науке АО «Ульяновский НИАТ», e-mail: fzbn@mail.ru.

About the authors

Oleg I. Morozov (Ulyanovsk, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Materials Science and Metal Processing, Ulyanovsk State Technical University, e-mail: olmorozov-rabota@yandex.ru.

Valery N. Kokorin (Ulyanovsk, Russian Federation) – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Science and Metal Processing by Pressure, Ulyanovsk State Technical University, e-mail: vnkokorin@mail.ru.

Vladimir P. Tabakov (Ulyanovsk, Russian Federation) – Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department Innovative Technologies in Mechanical Engineering, Ulyanovsk State Technical University, e-mail: vpt1947@mail.ru.

Damir I. Sagitov (Ulyanovsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, Department of Aviation Technology, Deputy Dean of the Faculty of Flight Operations and Air Traffic Control, Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after the Chief Marshal of Aviation B.P. Bugaev, e-mail: sagdam@mail.ru.

Yuri A. Titov (Ulyanovsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, Department of Materials Science and Metal Processing, Deputy Dean of the Faculty of Engineering, Ulyanovsk State Technical University, e-mail: tya@ilstu.ru.

Maxim V. Ilyushkin (Ulyanovsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Science, Deputy of General Director in Science, PC "Ulyanovsk NIAT", e-mail: fzbn@mail.ru.