

машиностроении. – 2014. – №5(35). – С. 27-31.

3. Смоленцев, В.П., Смоленцев, Е.В. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А.Соловьева. – 2017. – № 2. – С.5-9.

4. Пат. № 2464137 РФ. Способ получения локального участка охлаждения теплонагруженной детали / В.П.Смоленцев и др. // Заявка 2010144769 от 01.11.10. Оpub.20.10.12, Бюл. № 29.

5. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.

## REFERENCES

1. Beziyazychny, V.F. *Fundamentals to Ensure Quality of Metal Produce with Non-Organic Coating* / V.F. Beziyazychny, V.Yu. Zamyatin, A.Yu. Zamyatin, Yu.P. Zamyatin. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 608.

2. Safonov, S.V. Modes of electro-spark alloying and metal product coatings / S.V. Safonov, V.P. Smolentsev, V.G. Gritsyuk // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No. 5(35). – pp. 27-31.

3. Smolentsev, V.P., Smolentsev, E.V. State and outlooks in development of combined machining / *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk*. – 2017. – No. 2. – pp. 5-9.

4. Pat. No. 2464137 the RF. *Method of Obtaining Local Area of Cooling in Heat-loaded Part* / V.P. Smolentsev et al. // Application 2010144769 of 01.11.10. published 20.10.12, Bull. No. 29.

5. Smolentsev, E.V. *Design of Electric and Combined Methods of Machining*. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – pp. 511.

Рецензент д.т.н. П.Ю. Бочкарев

УДК 621.071

DOI: 10.30987/article\_5bd8aa8a0c2539.01565105

О.И. Морозов, инженер,

В.Н. Кокорин, д.т.н.,

В.П. Табаков, д.т.н.

(ФБГУ ВО «Ульяновский государственный технический университет,  
г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)

Д.И. Сагитов, к.т.н.

(ФБГУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации  
имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева», г. Ульяновск, ул. Можайского 8/8)

М.В. Илюшкин, к.т.н.

(АО «Ульяновский НИАТ», Ульяновск, ул. Врача Михайлова, 34)

Н.А. Ширманов, к.т.н.

(ФБГУ ВО «Ульяновский государственный технический университет,  
г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)

E-mail: vnkokorin@mail.ru

## Физическая модель структурирования системы «подложка – покрытие» в процессах комплексного модифицирования поверхностного слоя рабочих частей штампов и пресс-форм

Рассмотрены основные способы повышения стойкости рабочих частей штампового инструмента, в том числе процессы холодного пластического деформирования при нанесении износостойких покрытий методом ионно-плазменного напыления. Представлена физическая модель процесса холодного пластического деформирования образцов из теплостойкой стали X12M.

**Ключевые слова:** штамп; пресс-форма; механическая активация; деформация; износостойкость; покрытие; ионно-плазменное напыление; адгезия.

O.I. Morozov, Engineer,  
V.N. Kokorin, Dr. Sc. Tech,  
V.P. Tabakov, Dr. Sc. Tech.

(FBSI HE "Uliyanovsk State Technical University, 32, Northern Venets Str., Uliyanovsk)

D.I. Sagitov, Can. Sc. Tech.

(FBSI HE "Chief Air Marshal Bugaev Civil Aviation Institute of Uliyanovsk", 8/8, Mozhaisky Str., Uliyanovsk)

M.V. Ilyushkin, Can. Sc. Tech.

(JSC "RIAT of Uliyanovsk", 34, Doctor Mikhailov Str., Uliyanovsk)

N.A. Shirmanov, Can. Sc. Tech.

(FBSI HE "Uliyanovsk State Technical University, 32, Northern Venets Str., Uliyanovsk)

## Physical model of «substrate-coating» system structuring in complex modification processes of surface layers in working parts of dies and press molds

*Basic methods to increase durability of die working parts including processes of cold plastic deformation at anti-wear coatings application by a method of ion-plasma sputtering are considered. A physical model of cold plastic deformation of samples made of heat-resistant steel H12M is presented.*

**Keywords:** die; press mold; mechanical activation; deformation; wear-resistance; coating; ion-plasma sputtering.

На современном этапе научно-технического прогресса востребованы наукоемкие технологии, позволяющие повысить прочность, вязкость и другие характеристики конструкционных материалов.

Прежде всего, это относится к штамповому инструменту объемной (холодной, горячей) и листовой штамповки, поскольку процессы деформирования сопровождаются повышенным износом рабочих частей штампов и пресс-форм, разрушением, что приводит, как к выходу из строя самого инструмента, так и к снижению качества получаемых изделий. В связи с этими особенностями, наряду с другими методами интенсификации технологических операций, развивается направление по повышению стойкости рабочих деталей штампов и пресс-форм.

На современном этапе основные методы повышения стойкости штампового инструмента реализуются за счет следующих направлений поверхностной упрочняющей обработки: деформационное воздействие; термическое воздействие; поверхностное легирование; нанесение покрытий; комбинированная обработка.

В Ульяновском государственном техническом университете разработан способ повышения стойкости рабочих деталей штампов и пресс-форм на основе комплексного модифицирования, включающего в себя холодную пластическую деформацию с механической активацией поверхностных слоев инструмента

с последующим нанесением износостойких покрытий методом ионно-плазменного напыления [1].

Механическая активация – основной способ механического воздействия на твердые тела, вызывающие искажение кристаллической решетки за счет деформационного упрочнения металла. Установлено [2], что механическая активация вызывает следующие физические явления: эмиссию электронов и создание разности потенциалов; увеличение свободной поверхности вещества; возникновение упругих и пластических деформаций, и, как следствие, интенсивное упрочнение металла; релаксацию напряжений.

Возникающие искажения кристаллической решетки минералов являются причиной возникновения точечных дефектов и линейных дислокаций, несущих соответствующий запас «избыточной» энергии, что приводит, как следствие, к повышению адгезионной способности системы «подложка – покрытие».

Предложенная технология заключается в том, что рабочие поверхности штампов перед ионно-плазменным напылением подвергаются механической активации, заключающейся в холодной пластической деформации, при которой наблюдаются снижение теплопроводности штампа и уменьшение зоны температурного воздействия на подложку; снижение разупрочнения металла подложки и, как следствие, снижение износа рабочих частей штампа; повышение твердости системы «подложка

–покрытие» и качества штампуемых деталей.

Однократное обкатывание при различных давлениях роликов формирует в поверхностном слое изделия сжимающие напряжения, что повышает адгезионную связь между покрытием и инструментальным материалом (подложкой). Формирование в подложке высоких сжимающих напряжений снижает интенсивность процессов трещинообразования и способствует торможению трещин в материале покрытия.

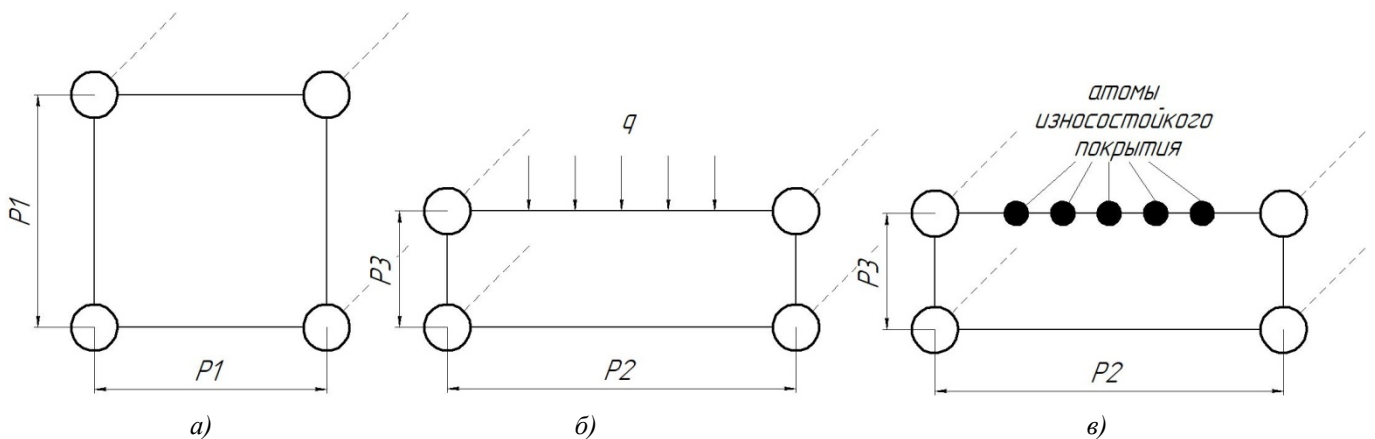
Наблюдаемый эффект обусловлен искажением кристаллической решетки металла, повышением плотности дислокаций при пластическом деформировании.

Для повышения эффективности процесса адсорбции в ряде публикаций зарубежных авторов предложено использовать механическую деформацию, заключающуюся в механической активации металла при реализации схемы одноосного сжатия заготовки [3–5]. На основании экспериментальных работ была

предложена теоретическая модель, которая объединяет механическую деформацию с энергией связи между элементами рассматриваемой системы: подложка (выполняющая функции катализатора) и покрытие (выполняющее функцию реагента).

Установлено, что для повышения эффективности адсорбции необходимо уменьшить энергию активации в продольном направлении кристаллической решетки (её растяжение), что соответствует эффекту, создаваемому механической одноосной деформацией сжатия [3 – 5].

На рис. 1 представлена физическая модель структурирования системы «подложка – покрытие» (фрагмент кристаллической решетки подложки) при комплексном модифицировании (холодная пластическая деформация с последующим ионно-плазменным напылением), позволяющая иллюстрировать повышение эффективности процесса адсорбции частицами вещества покрытия (реагента) на подложку.



**Рис. 1. Физическая модель структурирования системы «подложка – покрытие» при комплексном модифицировании поверхностного слоя:**

*a* – исходная структура (период  $P1$ ); *б* – продеформированная структура – одноосное сжатие ( $P2 > P1$ ,  $P3 < P1$ ); *в* – модифицированная структура

Как установлено в работах [3 – 5], возникающее механическое напряжение увеличивает силу связи между элементами системы «подложка – покрытие», что является результатом «стягивания» атомов металла подложки при некоторой величине деформации поверхности подложки.

С целью изучения характера напряженного и деформированного состояния тела при предварительной холодной пластической деформации разработана модель процесса одноосного растяжения (осадка) с использованием программного пакета LS-Dyna, представлен анализ адекватности полученной модели.

Моделирование процессов осадки проводилось с использованием программной среды LS-Dyna – многоцелевой программы, предназначенной для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Она включает в себя полностью автоматизированный процесс решения контактных задач. Множество функций по проверке получаемого решения позволяет успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формообразования.

Подготовка включала в себя создание геометрической и конечно-элементной модели процесса, определение типов элемента, моде-

лей материала, контактных параметров процесса, введение ограничений и нагрузок, действующих на модель, определение времени расчета и всех других необходимых параметров для выполнения расчета.

Для получения данных о пластичности материала используют экспериментальную кривую деформирования после одноосного растяжения [6].

В настоящих исследованиях в качестве материала модели и образцов была использована инструментальная теплостойкая сталь X12M ГОСТ 5950-2000. На основании анализа литературных источников были изучены результаты механических испытаний на растяжение стали X12M и использована диаграмма испытания на растяжение (максимальное значение предела прочности  $\sigma_b$  составило 1422 МПа, среднее – 1364 МПа) (рис. 2).

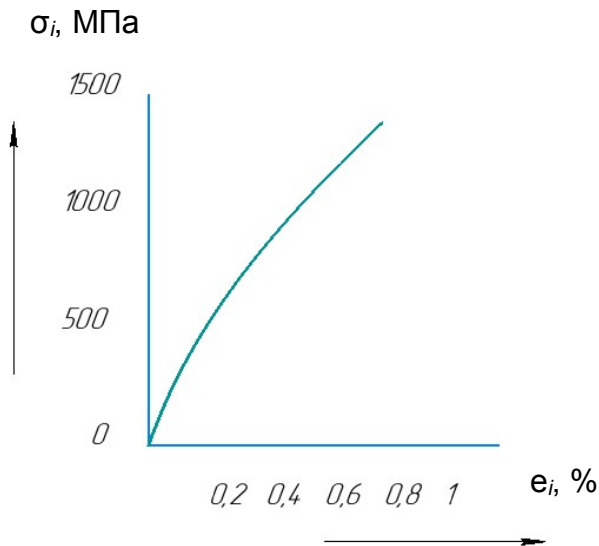


Рис. 2. Диаграмма испытаний на растяжение образцов из стали X12M

Для более точной верификации параметров материала при создании модели были использованы результаты исследования А.Д. Хвана [7], согласно которому для стали X12M по результатам испытаний на сжатие цилиндрических образцов была построена с целью оценки ее механических характеристик кривая течения (рис. 3) в координатах: интенсивность напряжений  $\sigma_i$  – интенсивность деформаций  $\epsilon_i$ .

Экспериментальные испытания (осадка образцов-следов) проводились на гидравлическом прессе (номинальная сила прессы – 1500 кН), материал образцов – сталь X12M, исходные размеры образцов  $a \times b \times S_0 = 10 \times 10 \times 5$  мм, режимы эксперимента представлены в табл. 1.

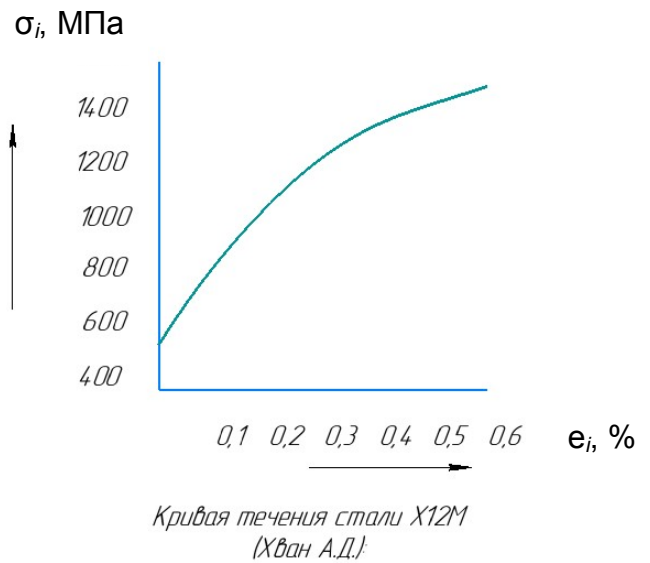
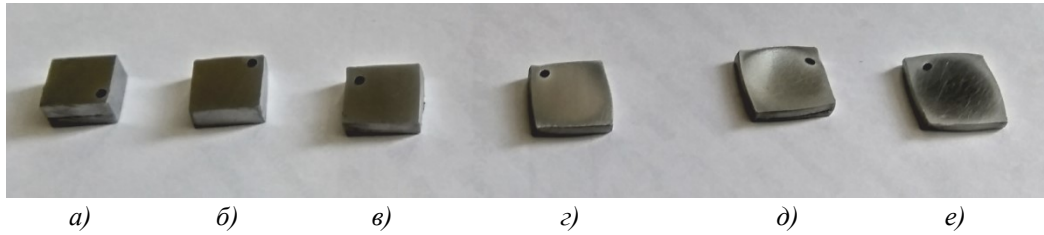


Рис. 3. Кривая течения стали X12M

1. Режимы экспериментальных исследований при одноосном сжатии

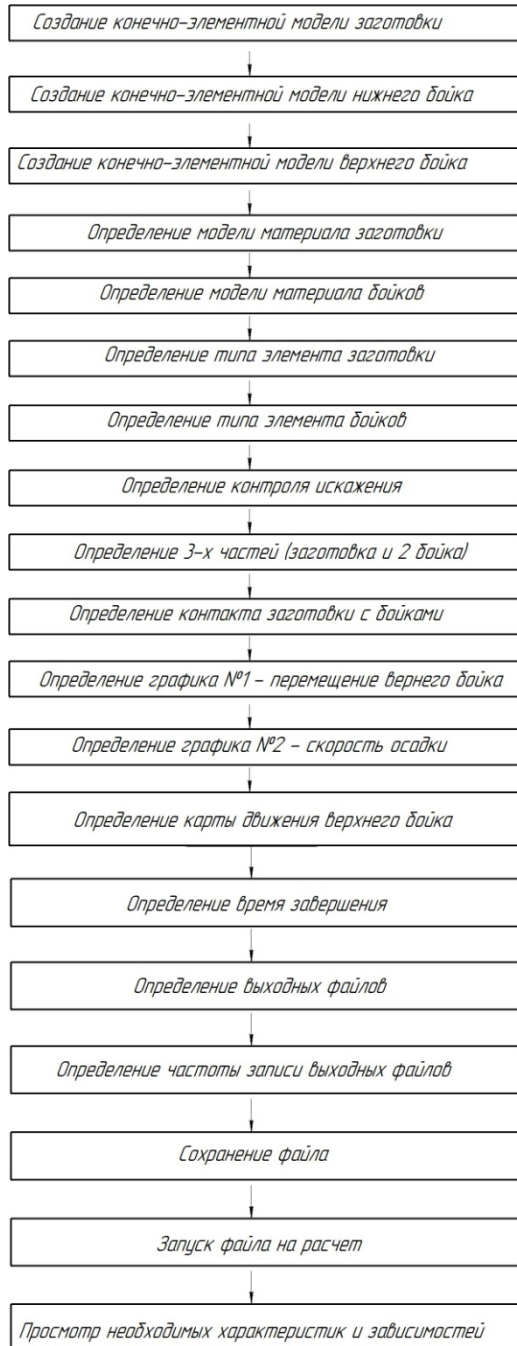
Материал образца	Исходные габаритные размеры образца, мм			Усилие деформирования F, т/с	Давление деформирования P, МПа	Габаритные размеры осажённых образцов, мм			Степень деформации при одноосном сжатии ε, %
	a	b	S <sub>0</sub>			a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	S	
X12M	10	10	5	9	882,6	11	11	4,2	17
				15	1470,9	12	12,5	3,6	28
				20	1961,3	12,5	13	3,1	38
				25	2451,6	13	13,5	2,7	47
				30	2941,9	14	14	2,2	59

По результатам механических испытаний по схеме осадки были получены образцы-следы, представленные на рис 4.



**Рис. 4. Образцы-следы, осаженные с разной степенью деформации:**  
 $a - \varepsilon = 0 \%$ ;  $b - \varepsilon = 17 \%$ ;  $v - \varepsilon = 28 \%$ ;  $z - \varepsilon = 38 \%$ ;  $d - \varepsilon = 47 \%$ ;  $e - \varepsilon = 59 \%$

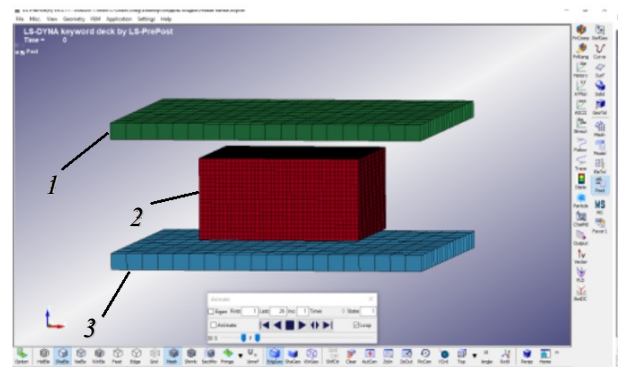
Для создания конечно-элементной модели данных была составлена блок-схема построения модели в программе LS-Dyna (рис. 5).



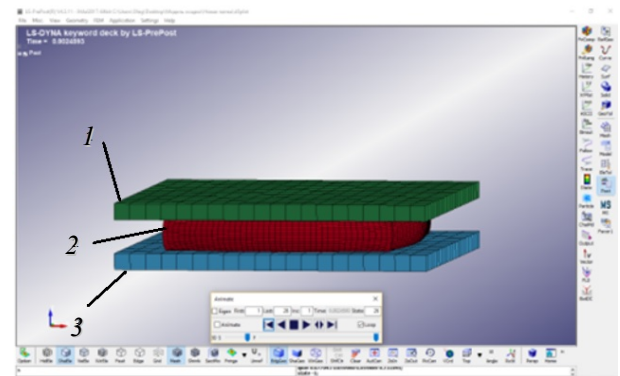
**Рис. 5. Блок-схема процесса создания конечно-элементной модели в среде LS-Dyna**

В результате проведенного моделирования была создана модель процесса осадки образца с габаритными размерами, соответствующим образцам, осаженным в процессе натурального эксперимента, определены и заданы физико-механические характеристики, тип и параметры материала, тип контакта, скорость осадки, карты движения бойков и время завершения процесса осадки.

Разработанная модель процесса осадки представлена на рис. 6.



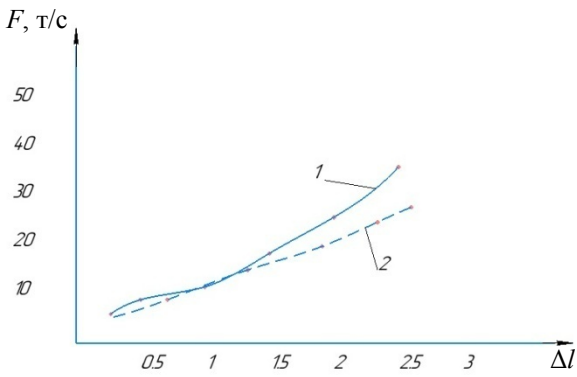
a)



b)

**Рис. 6. Модель процесса осадки, выполненная в программе LS-Dyna:**

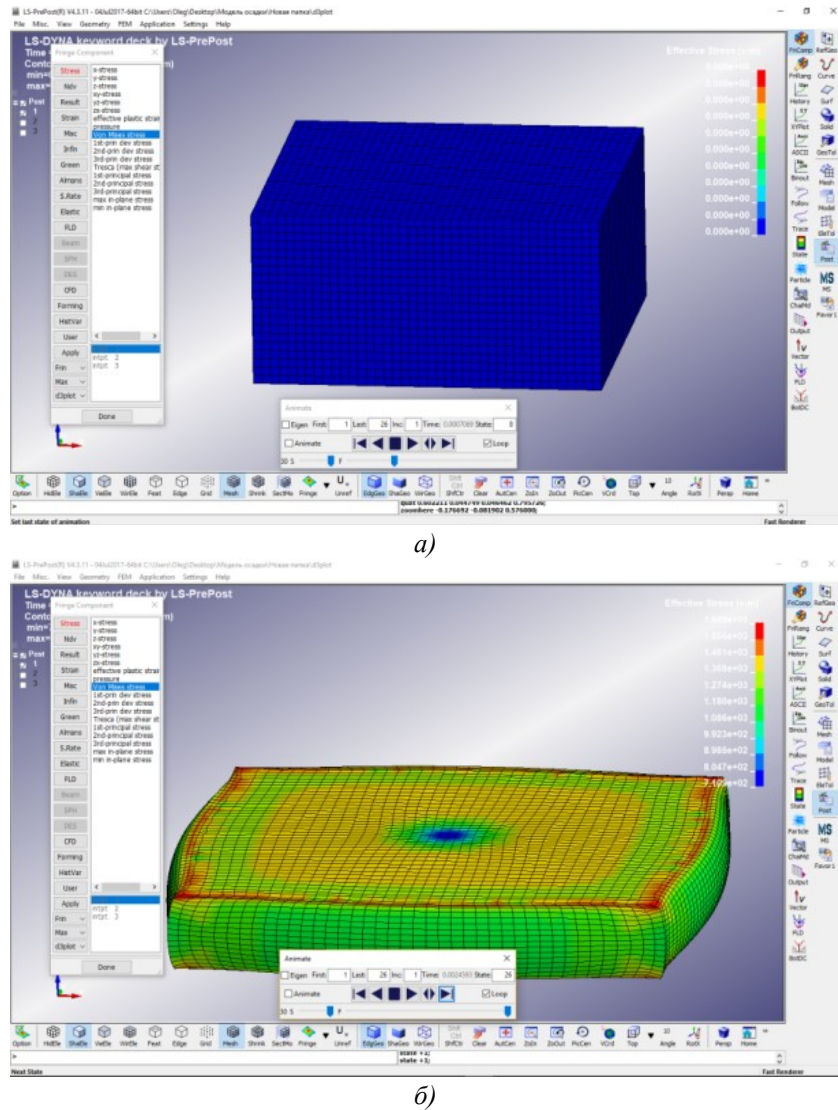
$a$  – до деформации;  $b$  – в процессе деформации;  
 1 – верхний боек; 2 – заготовка; 3 – нижний боек



**Рис. 7. График зависимости усилия от степени деформации  $F = f(\Delta l)$ :**  
 1 – кривая, полученная по результатам моделирования в среде LS-Dyna; 2 – кривая, полученная в результате эксперимента

В качестве параметра, оценивающего адекватность физической модели осадки реальным результатам, была выбрана зависимость, полученная по результатам моделирования и натурального эксперимента, усилия осадки от степени деформации, графическая интерпретация которой представлена на рис. 7.

Полученная модель, как видно из графика (см. рис. 7), вполне корректно отображает результаты натурального эксперимента (расхождение кривых по значению  $\Delta F$  не превышает 5...7 т/с). Увеличение  $\Delta F$  при деформациях, превышающих 40 %, происходит в результате упрощений программного расчета, вызванных увеличенным масштабом конечно-элементной сетки. Погрешности расчета могут быть снижены путем увеличения участвующих в расчете элементов и, соответственно, времени расчета модели. Результаты моделирования процесса осадки представлены на рис. 8.



**Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние в процессе осадки образца:**  
 а – до начала процесса осадки; б – при  $\epsilon = 50\%$

Анализ данных, полученных в программе LS-Dyna, позволяет сделать вывод о характере нагружения в процессе осадки, а также о распределении и величине напряжений. Максимальные напряжения возникают по границам деформируемого образца (угловые концентраторы напряжений), причем с увеличением скорости нагружения и усилия осадки интенсивность роста напряжений повышается, что подтверждает корректность разработанной физической модели.

### Заключение

По результатам моделирования процесса осадки можно сделать вывод о корректности использования расчетной модели процесса одноосного сжатия для оценки физико-механических характеристик деформированного металла, напряженного состояния структуры, величин распределения деформации, энергии и других параметров обрабатываемых изделий. При этом достигается высокая точность выходных параметров при условии введения в модель верифицированных входных данных. Так же стоит отметить, что для повышения точности выходных данных следует стремиться к увеличению числа элементов расчетной сетки.

Применение подобных моделей для предварительного расчета режимов деформации, оценки протекающих при пластической деформации процессов позволит сократить затраты на проведение натурных экспериментов.

Результатами возможности применения технологии комплексной модификации поверхностного слоя являются:

1. Увеличение эксплуатационного ресурса стойкости и работоспособности наиболее нагруженных деталей штампов и пресс-форм (пуансоны, матрицы, знаки, вставки и др.);

2. Повышение качества изделий, изготавливаемых с использованием инструмента с модифицированной поверхностью за счет снижения износа рабочих поверхностей штампа (повышение размерной точности, отсутствие заусенцев);

3. Снижение себестоимости продукции (интегральный критерий оценки эффективности технологии).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов, О.И., Табаков, В.П., Кокорин, В.Н., Титов, Ю.А. Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и пресс-форм из теплостойких сталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – В 3-х ч. Ч.1. – Вып. 11: – С. 64-68.
2. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1975. – С. 322-324, 481-483.
3. How strain can break the scaling relations of catalysis. Alireza Khorshidi, James Violet, Javad Hashemi & Andrew A. Peterson. *Jornal Nature Catalysis*, volume 1, p.263–268 (2018).
4. Wang, H. et al. Direct and continuous strain control of catalysts with tunable battery electrode materials. *Science* 354, 1031–1036 (2016).
5. Agrawal, P.M., Rice, B.M. & Thompson, D.L. Predicting trends in rate parameters for self-diffusion on fcc metal surfaces. *Surf. Sci.* 515, 21–35 (2002).
6. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: 3-е изд. В 2-х частях. Ч. 2. – М.: Машиностроение, 1974.
7. Хван, А.Д., Хван, Д.В., Осинцев, А.Л. Повышение стойкости инструментальной стали X12M // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 5. – С. 131-134.

### REFERENCES

1. Morozov, O.I., Tabakov, V.P., Kokorin, V.N., Titov, Yu.A. Durability increase in working parts of heat-resistant steel dies and press molds // *Transactions of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2017. – in 3 Parts. Part 1. – Edition 11: - pp. 64-68.
2. Geller, Yu.A. *Tool Steels*. – М.: Metallurgy, 1975. – pp. 322-324, 481-483.
3. How strain can break the scaling relations of catalysis. Alireza Khorshidi, James Violet, Javad Hashemi & Andrew A. Peterson. *Jornal Nature Catalysis*, volume 1, p.263–268 (2018).
4. Wang, H. et al. Direct and continuous strain control of catalysts with tunable battery electrode materials. *Science* 354, 1031–1036 (2016).
5. Agrawal, P.M., Rice, B.M. & Thompson, D.L. Predicting trends in rate parameters for self-diffusion on fcc metal surfaces. *Surf. Sci.* 515, 21–35 (2002).
6. Fridman, Ya.B. *Mechanical Properties of Metals. Mechanical Tests. Structural Strength*: 3d Edition. In 2 Parts. Part 2. – М.: Mechanical Engineering, 1974.
7. Khvan, A.D., Khvan, D.V., Osintsev, A.P. Durability increase of tool steel H12M // *Bulletin of Voronezh State University*. – 2012. – Vol.8. No.5. – pp. 131-134.

Рецензент д.т.н. В.И. Филимонов