

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.071

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

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.

Основными тенденциями в современном машиностроительном производстве является создание новых машин и механизмов с высокими рабочими характеристиками на основе изготовления деталей и заготовок, обладающих высоким уровнем физико-механических, технологических и потребительских свойств.

На современном этапе научно-технического прогресса прочность, вязкость и другие характеристики конструкционных материалов возрастают столь быстро, что инструментальные материалы, которыми располагает производство, в целом ряде случаев не позволяют осуществлять высокопроизводительную обработку заготовок. В связи с этими особенностями современного производства в металлообработке наряду с другими методами интенсификации технологических операций развивается направление по повышению стойкости рабочих деталей штампов и пресс-форм.

Все многообразие использующихся в инструментальном производстве методов поверхностной упрочняющей обработки можно разделить на пять групп: деформационное воздействие; термическое воздействие; поверхностное легирование; нанесение покрытий; комбинированная обработка.

При холодном деформационном воздействии происходит наклеп поверхностного слоя режущего инструмента, изменяется его микрогеометрия и энергетический запас.

Результатом термического воздействия на поверхностный слой инструмента является изменение его структуры, при этом его химический состав остается неизменным.

Поверхностное легирование изменяет химический состав и, как правило, структуру поверхностного слоя инструмента.

При нанесении покрытий на поверхности режущего инструмента происходит формирование тонкой пленки, повышающая физико-механические характеристики поверхностного слоя.

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, включающую в себя механическую активацию поверхностных слоев инструмента с последующим нанесением износостойких покрытий методом ионно-плазменного напыления [1].

Механическая активация (МА) — основной способ механического воздействия на твердые тела, вызывающие искажение кристаллической решетки за счет деформационного упрочнения металла. Установлено [2], что МА 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».

Известно, что наиболее эффективным методом повышения работоспособности инструмента является нанесение износостойких покрытий. Целью нанесения покрытий заключается в получении инструмента с износостойким поверхностным слоем и вязкой прочной основой. На основании эксплуатационных требований нанесению износостойких покрытий должны подвергаться инструментальные материалы, имеющие вязкую и прочную основу, недостаточную твердость и износостойкость – инструментальные (теплостойкие и полутеплостойкие) и быстрорежущие стали, твердые сплавы групп ВК и ТТК, твердые сплавы группы ТК, имеющих высокую прочность, такие как Т5К10, Т14К8, Т8К7 [3].

Вакуумно-дуговое нанесение покрытий (катодно-дуговое осаждение) - физический метод нанесения покрытий (тонких плёнок) в вакууме путём конденсации на подложку материала катодов из плазменных пото-

ков. Метод также известен под названиями: катодно-дуговое осаждение (англ. Arc-PVD), метод КИБ — катодно-ионной бомбардировки или, по-другому, метод конденсации вещества из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности (последнее — оригинальное авторское название создателей метода).

Катодно-дуговое осаждение активно используется для синтеза на поверхности режущего инструмента твёрдых износостойких и защитных покрытий, значительно продлевающих срок его службы. При помощи данной технологии может быть синтезирован широкий спектр сверхтвёрдых и нанокompозитных покрытий, включая TiN, TiAlN, CrN, ZrN, AlCrTiN и TiAlSiN [3].

Измельчение структуры (уменьшение размера зерна) материала покрытия сопровождается ростом твердости до некоторого критического среднего размера нанозерна (наноразмерный эффект). Снижение твердости при дальнейшем уменьшении среднего размера зерна в покрытии происходит из-за проскальзывания по межзеренным границам (ротационный эффект). Для дальнейшего повышения твердости требуется затормозить процесс скольжения по межзеренным границам, что может быть достигнуто за счет формирования соответствующей структуры с упрочнением межзеренных границ.

Разработанная технология повышения стойкости рабочих деталей штампов и пресс-форм за счет комплексной модификации поверхностного слоя заключается в следующем: рабочие части штампов листовой, холодной объемной и горячей штамповки перед напылением износостойкого покрытия ионно-плазменным методом подвергают холодному пластическому деформированию, вызывающему механическую активацию металла подложки, способствующую повышению адгезионных свойств системы «подложка-покрытие» [1].

При этом формируется благоприятная текстура (макро-, микро-), происходит активация и механический наклеп (деформационное упрочнение) в области рабочей зоны, что позволяет снизить теплопроводность металла, уменьшить температурное воздействие на металл за счет создания локализованной (местной) зоны температурного воздействия в поверхностном слое и уменьшить разупрочнение металла.

Модификация поверхности за счет механической активации позволит существенно повысить адгезионную способность системы «подложка-покрытие» при повышении эксплуатационных и ресурсных свойств.

Разрабатываемая технология модификации поверхности может быть использована для повышения стойкости и работоспособности рабочих поверхностей роликов, штампов листовой, холодной объемной и горячей штамповки (пуансонов, матриц, знаков, вставок) из полутеплостойких и теплостойких сталей повышенной вязкости, а также пресс-форм в процессах прессования профилей.

Задача исследования – выбрать рациональные режимы механической активации поверхностного слоя за счет холодного деформационного упрочнения металла. Для проектирования технологического процесса штамповки важно знать напряженное и деформированное состояние каждого участка заготовки в течение всего процесса, что определяется механической схемой деформации.

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 [4-6,10]. 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 (выполняющая 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 [4-6].

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.

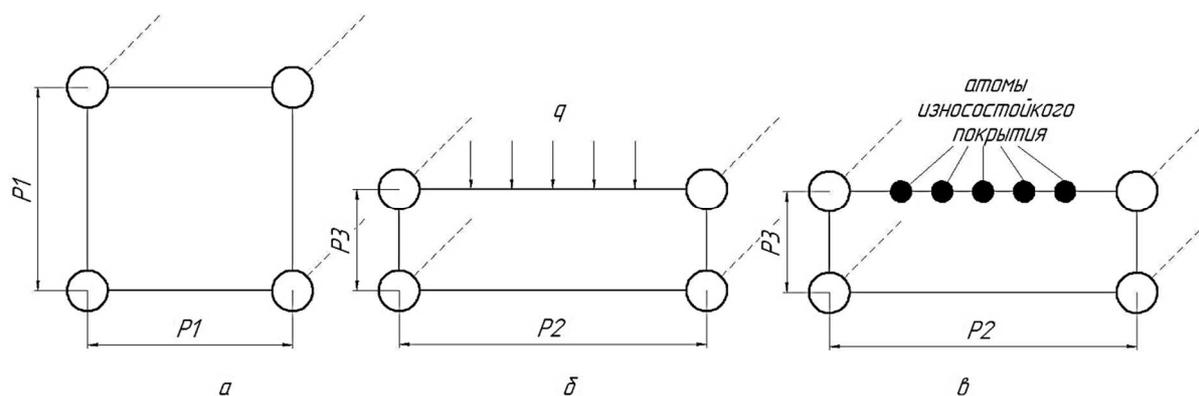


Рис 1. Физическая модель структурирования системы «подложка-покрытие» при комплексном модифицировании поверхностного слоя: а – исходная структура (период $P1$); б – продеформированная структура, – одноосное сжатие ($P2 > P1$, $P3 < P1$); в – модифицированная структура системы «подложка-покрытие»

Как установлено в работах [4-6], 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 осадки 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, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формообразования.

Выполнение процесса моделирования состоит из 3-х основных этапов: препроцессорная подготовка; решение задачи; постпроцессорная обработка.

При работе с программой LS-DYNA требуется вводить значения напряжений и деформаций в виде истинных напряжений и деформаций. При малых деформациях значения расчетных и истинных параметров практически идентичны. Однако, по мере возрастания деформаций эти значения существенно расходятся. Для получения данных о пластичности материала используют кривую деформирования после одноосного растяжения [7-9].

В экспериментальных исследованиях в качестве материала модели и образцов для была использована инструментальная теплостойкая сталь X12МГОСТ 5950-2000. На основании анализа литературных источников изучены результаты механических испытаний на растяжение стали X12М и использована диаграмма испытания на растяжение (максимальное значение предела прочности σ_b составило 1422 МПа, среднее 1364 МПа) представленная на рис. 2, а.

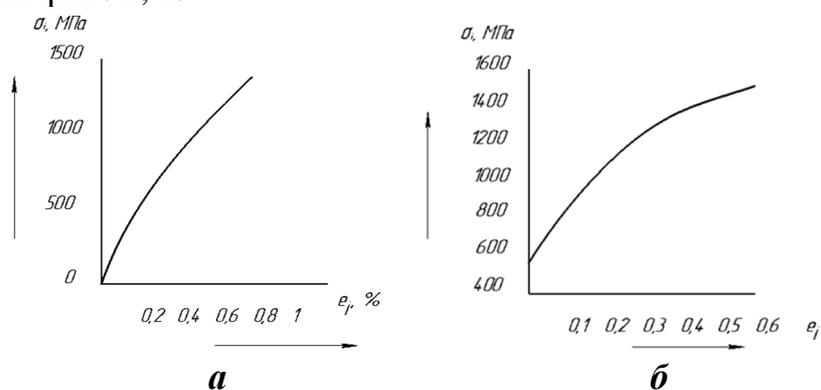


Рис. 2. Диаграммы испытаний образцов из стали X12М:
а – кривая испытаний на растяжение; б – кривая течения металла

Для более точной верификации параметров материала при создании модели были использованы результаты исследования А.Д. Хвана [11], согласно которому для стали Х12М по результатам испытаний на сжатие цилиндрических образцов была построена с целью оценки ее механических характеристик кривая течения (рис.2б) в координатах: интенсивность напряжений (σ_i) – интенсивность деформаций (ϵ_i).

Экспериментальные испытания (осадка образцов-следов) проводились на гидравлическом прессе (номинальное усилие прессы – 1500 кН), материал образцов – сталь Х12М, исходные размеры образцов $a*b*s_0=10x10x5$ (мм), режимы эксперимента представлены в таблице.

**Режимы экспериментальных исследований
при одноосном сжатии**

№ п/п	Материал образца	Исходные габаритные размеры образца			Усилие деформирования F, тс	Давление деформирования P, МПа	Габаритные размеры осажённых образцов			Степень деформации при одноосном сжатии ϵ , %
		a, мм	b, мм	S ₀ , мм			a ₁ , мм	b ₁ , мм	S, мм	
1	Х12М	10	10	5	9	882,6	11	11	4,2	17
2					15	1470,9	12	12,5	3,6	28
3					20	1961,3	12,5	13	3,1	38
4					25	2451,6	13	13,5	2,7	47
5					30	2941,9	14	14	2,2	59

В результате проведенного моделирования была создана модель процесса осадки образца с габаритными размерами, соответствующим образцам, осажённым 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. 3.

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. 4.

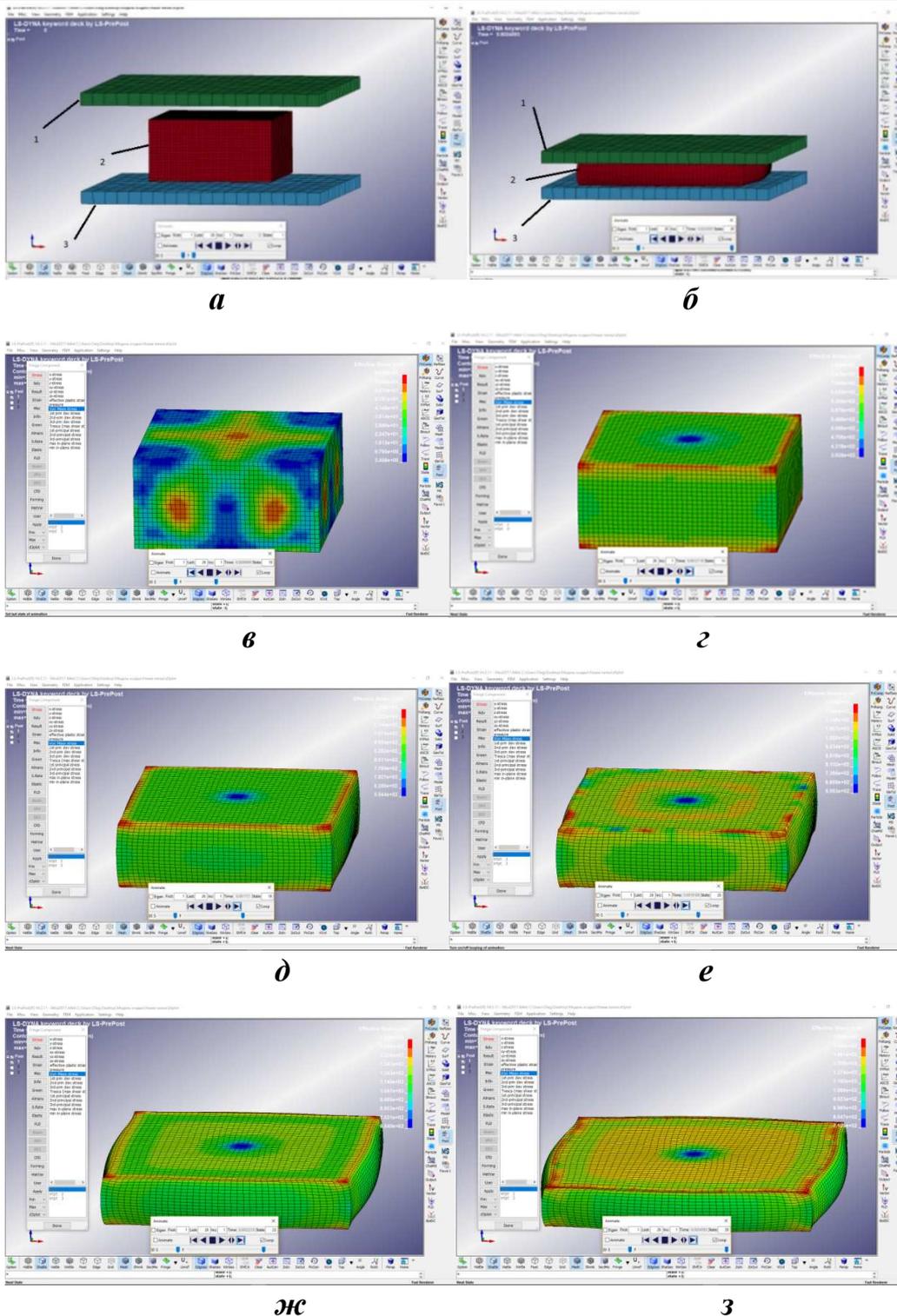
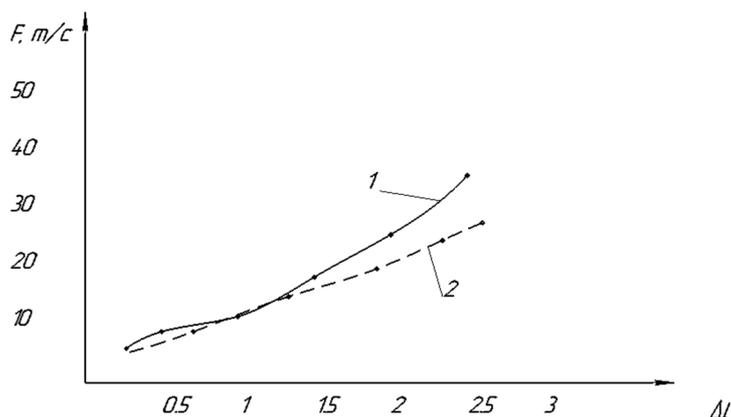


Рис. 3. Модель процесса осадки и её напряженно-деформированное состояние в процессе осадки образца: 1 – верхний боек; 2 – заготовка; 3 – нижний боёк; а – модель до деформации, б – в процессе деформации; в – заготовка в начале процесса течения металла; з – заготовка при $\varepsilon=10\%$; д – заготовка при $\varepsilon=20\%$; е – заготовка при $\varepsilon=30\%$; ж – заготовка при $\varepsilon=40\%$; з - заготовка при $\varepsilon=50\%$



**Рис. 4. 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**

Полученная модель, как видно из графика (рис. 4), вполне корректно отображает результаты натурального эксперимента (расхождение кривых по значению ΔF не превышает 5...7 тс). Увеличение ΔF 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.

Анализ изображений на рис. 3, в - з 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.

Для нанесения износостойких покрытий были применены специализированные установки типа «Булат», используемые в лаборатории износостойких покрытий УлГТУ.

На предварительно осаженные образцы ($\epsilon=17...59\%$) после подготовки поверхности (полирования алмазными пастами АСМ различных типов зернистости) было нанесено износостойкое покрытие на основе нитрида титана. Режим нанесения износостойкого покрытия методом ионно-плазменного напыления включал в себя следующие параметры: материал покрытия - нитрид титана (TiN), толщина покрытия - 3...4 мкм, температура - 480 °С.

Деформированные образцы с нанесенным износостойким покрытием представлены на рис. 5.

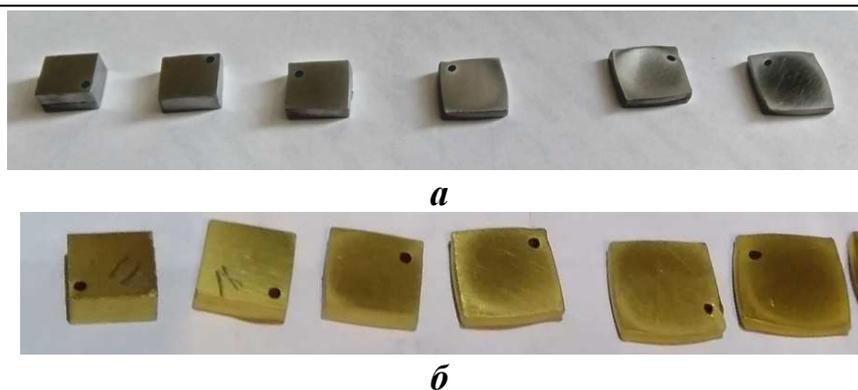


Рис. 5. Деформированные образцы: а – до нанесения износостойкого покрытия; б - после нанесения износостойкого покрытия TiN

В качестве параметра, оценивающего повышение стойкости поверхностного слоя образцов, был выбран параметр адгезионной способности износостойкого покрытия – коэффициент отслоения K_0 , уменьшение которого свидетельствует о повышении прочности адгезии покрытия с инструментальной основой.

Для оценки параметра адгезионной способности износостойкого покрытия на основе нитрида титана использовано устройство для испытания заготовок с покрытием на отслоение [12], заключающееся в фиксировании минимального усилия сжатия пружин на момент нарушения сплошности защитного покрытия (отслоение).

На основании экспериментальных данных была получена зависимость коэффициента отслоения износостойкого покрытия $K_{0от}$ от степени предварительной деформации образца ϵ , представленная на рис. 6.

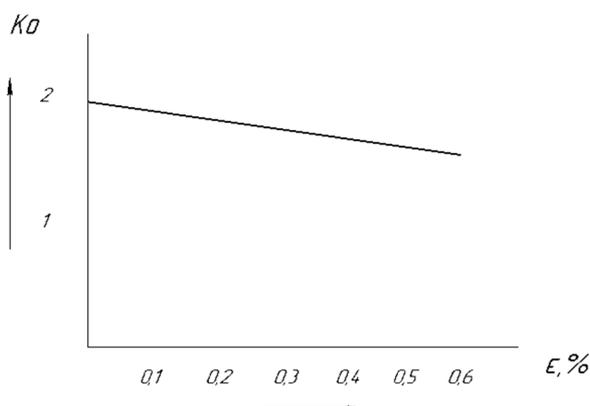


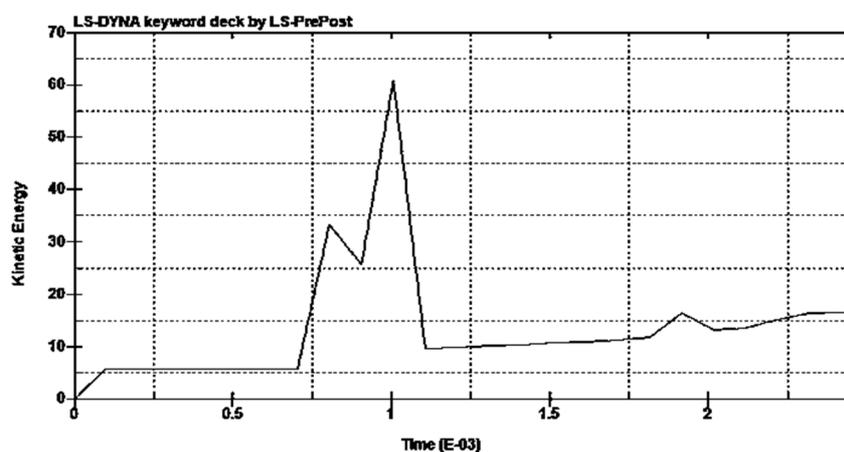
Рис. 6. График зависимости коэффициента отслоения от степени деформации

Результаты и обсуждение

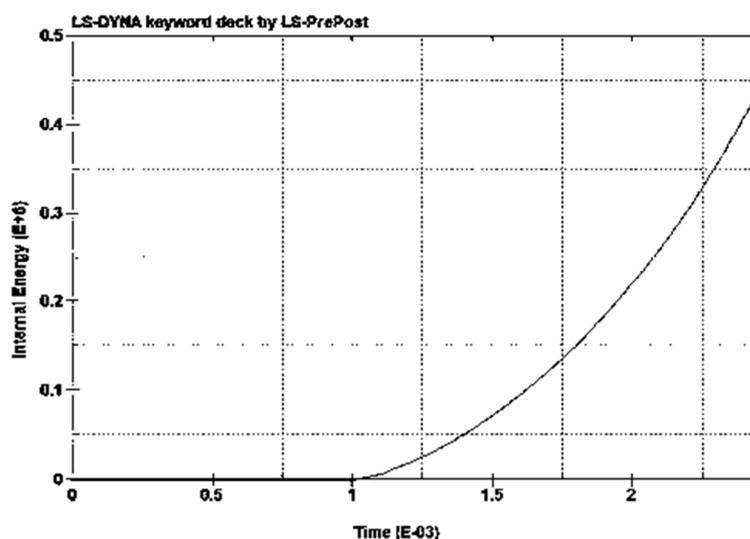
Установлено, что при повышении степени деформации в процессе осадки и реализации МА (1 этап комплексного модифицирования поверхностного слоя) наблюдается линейное снижение коэффициента отслоения

Кона 15...20% от 2-х ($\epsilon=0\%$) до 1,6 ($\epsilon=60\%$), что свидетельствует о эффективности комплексной модификации поверхностного слоя, включающей в себя холодную пластическую деформацию поверхностных слоев инструмента с последующим нанесением износостойких покрытий методом ионно-плазменного напыления.

Как отмечено выше, в результате МА наблюдается изменение энергии в материале заготовки. На рис. 7 представлены материалы изучения кинетической и потенциальной энергии в материале образцов в процессе деформации по схеме одноосного сжатия. Резкий скачок кинетической энергии до максимального значения характеризуется началом резкого течения металла. Дальнейшее изменение обусловлено поэтапным уплотнением зерен в процессе деформационного упрочнения. С течением времени течение металла уменьшается, поэтому изменение амплитуда кинетической энергии снижается.



а



б

Рис. 7. Графики изменения энергии:
а - кинетической энергии заготовки в процессе деформации;
б - потенциальной энергии заготовки

Замедление роста потенциальной энергии так же связано с тем, что для начала деформации необходимо достижение напряжений, превышающих предел текучести металла. Дальнейший рост энергии обусловлен увеличением плотности дислокаций материала заготовки и необходимым для его деформирования усилием.

Программа позволяет производить расчеты зависимостей механических параметров как для всего объема заготовки, так и для её отдельных элементов конечно-элементной 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 натуральных экспериментов.

Применение технологии комплексной модификации поверхностного слоя позволит обеспечить:

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 на инструменте с модифицированной поверхностью за счет снижения износа рабочих поверхностей штампа (повышение размерной точности, отсутствие заусенцев);
3. Снижение себестоимости продукции (интегральный критерий оценки эффективности технологии).

Для оценки структурирования модифицированной системы «подложка-покрытие» были проведены комплексные металлографические исследования, представляемые в части 2 настоящей статьи.

Список литературы

1. Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и пресс-форм из теплостойких сталей. Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.Н., Титов Ю.А. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. Вып. 11. Ч. 1. С. 64-68.

2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. С. 70-116.

3. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.

4. How strain can break the scaling relations of catalysis. Alireza Khorshidi, James Violet, Javad Hashemi & Andrew A. Peterson. *Jornal Nature Catalysis*. 2018. Vol. 1. P. 263–268.

5. Wang H. et al. Direct and continuous strain control of catalysts with tunable battery electrode materials. *Science* 354, 2016. P. 1031–1036.

6. Agrawal P.M., Rice B.M., Thompson D.L. Predicting trends in rate parameters for self-diffusion on fcc metal surfaces. *Surf. Sci.* 515, 2002. P. 21–35.

7. Чернявский А.О. Метод конечных элементов. Основы практического применения.

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

9. Ray Browell, Dr. Guoyo Lin. The power of nonlinear materials capabilities. *Ansys solutions* 2000. Vol. 2. N. 1.

10. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Изд. 3-евдвухчастях. Часть вторая. Механические испытания. Конструкционная прочность. М.: Машиностроение, 1974.

11. 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.

12. Патент RU 37 221 U1 «Устройство для испытания покрытия на отслоение» 2003135362/20, 09.12.2003 Опубликовано: 10.04.2004 Бюл. № 10, Автор(ы): Илюшкин М.В. (RU), Филимонов В.И. (RU), Филимонов А.В. (RU).

Морозов Олег Игоревич, ассистент, olmorozov-rabota@yandex.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет,

Кокорин Валерий Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, vnkokorin@mail.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный технический университету,

Табаков Владимир Петрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, olmorozov-rabota@yandex.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет,

Сагитов Дамир Ильдарович, канд. техн. наук, доцент, заместитель декана факультета, sagdam@mail.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,

Илюшкин Максим Валерьевич, канд. техн. наук, заместитель генерального директора, fzbm@mail.ru, Россия, Ульяновск, АО «Ульяновский НИИТ»,

Ширманов Николай Анатольевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории износостойких покрытий, pas-shirmanov@yandex.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет

IMPROVING THE STABILITY OF WORKING SURFACES OF STAMPS DETAILS WHEN USING INTEGRATED MODIFICATION

O.I. Morozov, V.N. Kokorin, V.P. Tabakov, D.I. Sagitov, M.V. Ilyushkin, N.A. Shirmanov

The main ways to increase the durability of the working parts of the stamping tool are considered, including the processes of cold plastic deformation during the application of wear-resistant coatings by ion-plasma spraying. A physical model of the process of cold plastic deformation of samples from heat-resistant steel X12M is presented.

Key words: stamp, mold, mechanical activation, deformation, wear resistance, coating, ion-plasma spraying, adhesion.

Morozov Oleg Igorevich, assistant, olmorozov-rabota@yandex.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University,

Kokorin Valeriy Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the Department, ynkokorin@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University,

Tabakov Vladimir Petrovich, doctor of technical sciences, professor, head of the Department, olmorozov-rabota@yandex.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University,

Sagitov Damir Ildarovich, candidate of technical sciences, docent, deputy dean of the faculty, sagdam@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after the Chief Marshal of Aviation B.P. Bugaev,

Ilyushkin Maxim Valerevich, candidate of technical sciences, deputy general director, fzbm@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, JSC "Ulyanovsk NIAT",

Shirmanov Nikolay Anatolyevich, candidate of technical sciences, senior researcher, head of the laboratory of wear-resistant coatings, pas-shirmanov@yandex.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University