

8. *Прозорова Э. В.* О моделях механики сплошной среды // Международный научный журнал «Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах». Казань: КАИ, 2013. Вып. 1(39), т. 19. С. 31 – 44.
9. *Прозорова Э. В.* Влияние дисперсии в неравновесных задачах механики сплошной среды // Электронный журнал «Физико-химическая кинетика в газовой динамике». М.: МГУ, 2012. Т. 13. URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-10-30-001.pdf>.
10. *Prozorova. Evelina V.* Influence of the Delay and Dispersion In mechanics. Journal of Modern Physics, 2014, 5, Pp.1796 – 1805.
11. *Kononenko V. A., Prozorova E. V., Shishkin . A. V.* Influence dispersion for gas mechanics with great gradients. 27-th international symposium on Shock waves. St. Petersburg. 2009. Pp. 406 – 407.
12. *Galaev Oleg, Prozorova Evelina.* Dispersion effects in the Falkner-Skan problem and in the kinetic theory. Proceeding the 13th International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE15) to be held in Salerno, Italy, June 27-29, 2015.
13. *Галаев О. Ю., Прозорова Э. В.* Эффекты дисперсии и запаздывания в математических моделях. Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева. Вып. 1(45), том 22, 2016. С. 107 – 115.
14. *Wigner E. P.* Symmetries and reflections.//Bloomington-London. 1970.
15. *Зубарев Д. Н.* Неравновесная статистическая термодинамика. М.: Наука, 1971.
16. *Bulanov E. A.* The momentum tension on mechanics of solid, free flowing and liquid medium. College book. 2012.
17. *Валландер С. В.* Уравнения движения вязкого газа // Доклады АН СССР, 1951, т. 78(1). С. 25 – 27.
18. *Валландер С. В., Еловских М. П.* Теоретическая зависимость коэффициентов теплопроводности газов от температуры // Доклады АН СССР, 1951, т. 79(1). С. 37 – 40.
19. *Galaev O, Prozorova Evelina.* Dispersion Effects in the Falkner-Skan Problem and in the Kinetic Theory. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2017, 5. Pp. 522 – 537.
20. *Prozorova Evelina.* Some Paradoxes of Mathematical Theory of Continues Mechanics American Journal of Applied Mathematics. 2018; 6(1). Pp. 15 – 19.
21. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1970.
22. *Смирнов В. И.* Курс высшей математики. Т. II. 1974.
23. *Самарский А. А.* Введение численные методы. М.: Наука, 1987.
24. *Головизнин В. М., Зайцев М. А., Карabasов С. А., Короткин И. А.* Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. М.: Изд-во МГУ, 2013.

УДК 621.78,621.7-4

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО ШТАМПОВОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИОБИЯ И МОЛИБДЕНА

З. Н. Расулов, Е. Ю. Ремшев, Е. В. Затеруха, В. А. Лобов

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

Ниобий, молибден и сплавы на их основе являются перспективными для использования в радиоэлектронике, авиационной и ракетной технике. Эта группа конструкционных материалов обладает рядом отличительных особенностей: возможность эксплуатации при температу-

рах от -195 до 1400°C ; высокая удельная прочность; низкая температура порога хрупкости и коэффициент захвата тепловых нейтронов. Ряд свойств приводит к увеличению доли использования этих материалов. Физические и механические характеристики тугоплавких материалов зависят от чистоты и состояния поставки металла. Пластические характеристики ниобия в зависимости от содержания примесей существенно изменяются, также существенно изменяется температура отжига. Низкое сопротивление окислению, изменение температуры рекристаллизации в зависимости от степени деформации (увеличение степени деформации с 50 – 60% до 95 – 97% температура рекристаллизации ниобия снижается на $120^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$). Пластичность листового ниобия можно повысить проведением рекристаллизационного отжига при температурах $1200 - 1250^{\circ}\text{C}$. Однако прочность падает при этом на 30 – 40%.

Особенности ниобия, несмотря на его высокую пластичность приводят к ряду технологических проблем при реализации технологии холодной штамповки в производстве полых осесимметрических деталей: значительная доля брака (до 80%); нецелесообразность проведения межоперационного отжига, ввиду значительного изменения свойств металла в процессе технологии; высокая адгезия с инструментом и как следствие быстрый износ; невозможность оперативного контроля исходного материала и полуфабрикатов в процессе последовательных операций холодной штамповки. Отмеченные проблемы приводят к снижению производительности труда и повышению себестоимости изготовления изделий (рис. 1).

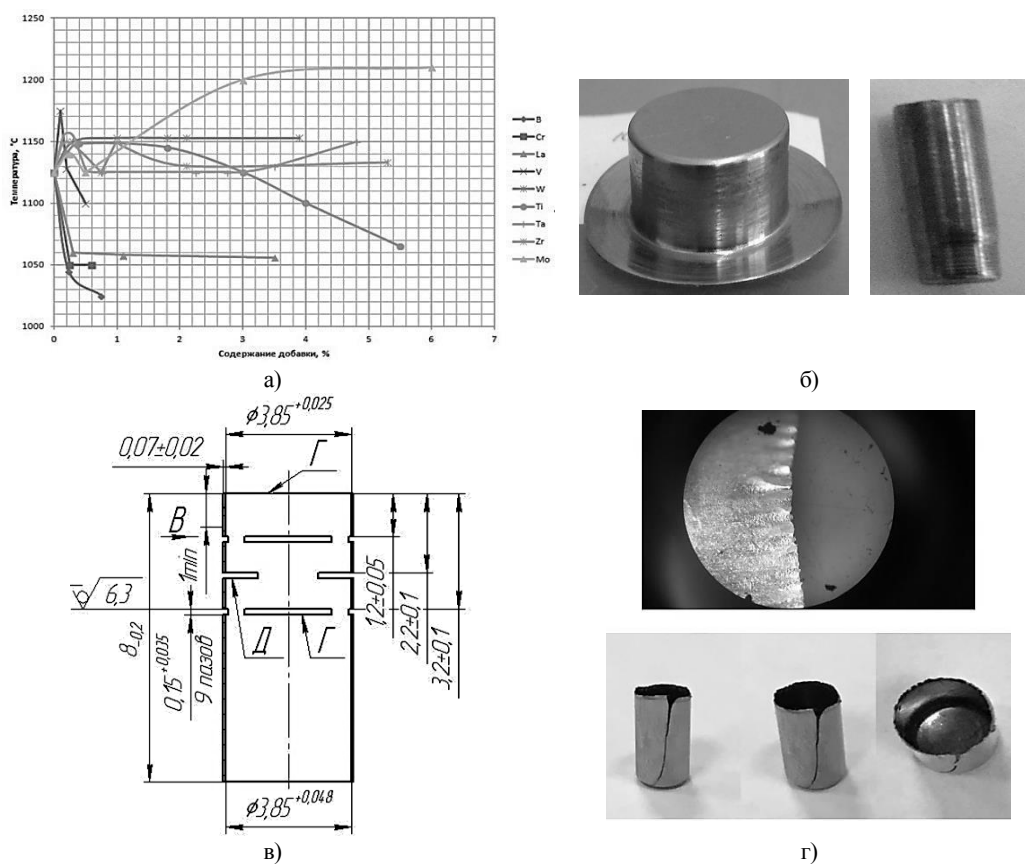


Рис. 1. Особенности холодной штамповки ниобия
 а – изменение температуры отжига ниобия в зависимости от содержания примесей;
 б – полые осесимметричные детали из молибдена и ниобия; в – эскиз изделия «экран»;
 г – виды брака на операциях (гофры, трещины)

Молибден подобно другим тугоплавким металлам, имеющим объемно-центрированную кубическую решетку, обладает температурным порогом хрупкости. Температурный порог хрупкости проявляется в резком повышении предела текучести при одновременном понижении пластических характеристик [1 – 3]. Природа перехода из вязкого состояния в хрупкое без каких-либо видимых структурных изменений в настоящий момент требует дополнительных исследований [4].

Пластическая деформация возникает в результате движения дислокаций. Атомы примесей, имеющихся в металле, блокируют дислокации, образуя «облака Коттрелла». При приложении нагрузки движение дислокаций задерживается у границ зерен, точечных дефектов и других препятствий, пока напряжения от внешней нагрузки не становятся достаточными для возникновения пластической деформации или для зарождения трещины. В первом случае происходит пластическое течение, во втором, когда скорость распространения микротрещины превышает скорость пластической деформации, наступает хрупкое разрушение [4]. Благодаря переходу из хрупкого состояния в вязкое, небольшой нагрев тугоплавких металлов улучшает их штампуемость. На температуру перехода влияет много факторов, важнейшими из которых являются химический состав, структура материала, скорость деформации, вид напряженно-деформированного состояния. Однако приводимые в литературе рекомендации по листовой штамповке молибдена с подогревом не содержат, как правило, каких-либо указаний по составу исследуемого материала, по его структуре и т. д. В практике разработки технологических процессов подогрев не всегда повышает штампуемость. Классический подход в решении поставленных задач связан с увеличением количества операций вытяжки, применением межоперационного вакуумного отжига, а также высокая точность изготовления инструмента и подготовка его поверхности. Все перечисленные инструменты не позволяют получить требуемый результат и повысить производительность, что приводит к значительным потерям. Исследования авторов [1-4] показывают эффективность структурного и субструктурного упрочнения, так например создание в молибдене особых типов дислокационных распределений (ячеистых дислокационных структур) позволяет повысить прочностные и пластические свойства. Решение обозначенных проблем при холодной штамповке молибдена и ниобия возможно при контроле качества исходного материала, построения моделей прогнозирования механических свойств в процессе холодной штамповки и наличия инструмента, позволяющего проводить структурные и субструктурные изменения в полуфабрикатах.

В рамках работы по совершенствованию технологических процессов изготовления изделий ПАО «Светлана» исследовали ниобий НБ-ПЛ1 и молибден МЧ-0,2. Результаты спектрального анализа образцов представлены в таблицах 1 и 2.

Наряду с ниобием и молибденом в ответственных изделиях применяется также ковар – сплав на основе железа с содержанием 18% кобальта и 29% никеля. В рамках первого этапа работы исследовали эффективность применения модификации штамповочного инструмента фторорганической наноконпозицией и оценивали ее влияние на качество штампуемых деталей. Механика взаимодействия фторорганической композиции с поверхностью твердого тела выглядит следующим образом – после нанесения фтор-ПАВ (поверхностно-активное вещество) на поверхности тела формируется слой ориентированных молекул, радикально меняющих энергетические характеристики поверхности. Молекулы, закрепляемые за счет сил хемосорбции (поглощение жидкостью или твердым телом веществ из окружающей среды), образуют «структуры Ленгмюра» (рис.2, а) в виде спиралей с нормально-ориентированными осями к поверхности материала рабочего инструмента. Известен положительный опыт снижения трения при штамповке медных сплавов с нанесением фтор-ПАВ [5]. Модифицировали рабочий инструмент вытяжки (свертки) изделий из ниобия и молибдена (рис.2, б). В существующей технологии изготовления на первой операции вытяжка (свертка) наблюдается потеря устойчивости (образуется гофра (рис. 2, г). Применение отжига кружка перед операцией вытяжка не приводит к повышению качества штампуемых полуфабрикатов, полирование инструмента вытяжки (пуансон, матрица) позволяет повысить качество полуфабрикатов, но на короткий период: после работы

штампа в течение 2 – 3 часов наблюдается снижение качества полуфабрикатов вследствие адгезии с инструментом.

Таблица 1
Химический состав исходного материала НБ-ПЛ1

№ и.о.	Химический состав, %								
	Nb	Ti	V	Fe	Mn	Co	W	Ni	Cu
1	98,81	0,28	0,23	0,22	0,13	0,07	0,06	0,05	0,02
2	98,68	0,31	0,29	0,25	0,10	0,07	0,06	0,05	0,04
3	98,67	0,43	0,22	0,22	0,15	0,06	0,05	0,04	0,02
4	98,60	0,41	0,25	0,24	0,15	0,07	0,06	0,05	0,02

Таблица 2
Химический состав исходного материала МЧ-0,2

№ и.о.	Химический состав, %									
	Mo	Ti	V	Fe	Mn	Nb	W	Co	Zr	Ni
Элементы	98,21	0,45	0,30	0,20	0,17	0,11	0,09	0,09	0,09	0,05
	98,54	0,33	0,25	0,17	0,12	0,10	0,09	0,08	0,08	0,05
	98,54	0,33	0,25	0,17	0,12	0,10	0,09	0,08	0,08	0,05

Поверхность пуансона и матрицы модифицировали фторорганической наноконпозицией [6], в процессе исследования исходный материал ниобия и молибдена в состоянии поставки также покрывали активным смазочным покрытием (рис. 2).

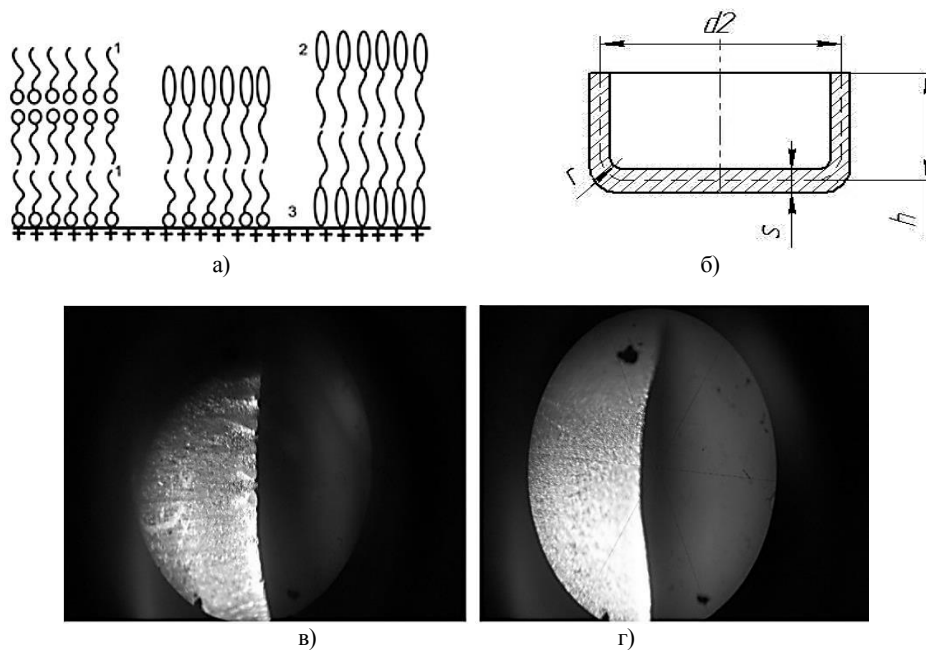


Рис. 2. Модификация штампового инструмента фторорганической наноконпозицией
а – структуры Ленгмюра, б – полуфабрикат вытяжки (свертки), в – кромка полуфабриката после свертки без модификации инструмента, г – кромка полуфабриката после свертки с модификацией инструмента

Модифицированные поверхности инструмента и полуфабрикатов оценивали способом измерения поверхностной энергии. Поверхностная энергия – прямое проявление межмолекулярных взаимодействий. Молекулы, находящиеся на поверхности жидкости или твердого тела, испытывают воздействие неуравновешенных молекулярных сил, вследствие чего получают дополнительную энергию по сравнению с молекулами, находящимися внутри жидкости или твердого тела.

Известно, что трибологические свойства узлов трения во многом определяются величиной их поверхностной энергии и соотношения ее дисперсионной и полярной составляющих обрабатываемого материала. Модифицирование уравнивает величины поверхностной энергии материалов. Этот факт может быть использован для назначения оптимального вида обработки композицией деталей из разных материалов, входящих в одну трибосистему. Модифицирование также увеличивает долю дисперсионного компонента. В жидкости поверхностная энергия проявляет себя как сила, стремящаяся уменьшить площадь поверхности до минимально возможной величины. Поверхность твердого тела также обладает дополнительной свободной энергией. Но, поскольку подвижность молекул на поверхности твердого тела отсутствует, эта поверхностная энергия не может непосредственно наблюдаться в виде поверхностного натяжения, поэтому измерять поверхностную энергию твердых тел можно только с помощью косвенных методов. Краевой угол – это угол между рассчитанным контуром капли и поверхностью образца, проекция которой на изображении капли называется базовой линией. Краевой угол (угол смачивания) измеряет смачиваемость твердой поверхности жидкостью. В случае полного смачивания (растекания) краевой угол 0° . Между 0° и 90° твердая поверхность смачивается жидкостью, если угол больше 90° – не смачивается. В случае ультрагидрофобности материалов возникает, так называемый эффект лотоса – краевой угол достигает теоретического предела 180° . Работа, которую необходимо применить для увеличения поверхности, называется свободная энергия поверхности (СЭП). Так как энергия измеряется на единицу площади, единицы измерения СЭП $\text{мДж}/\text{м}^2$, что эквивалентно $\text{мН}/\text{м}$. Для твердых поверхностей используется термин «свободная энергия поверхности», а для жидкостей – «поверхностное натяжение». Результаты измерения поверхностной энергии ниобия и кобальта представлены на рис. 3 и в таблице 3.

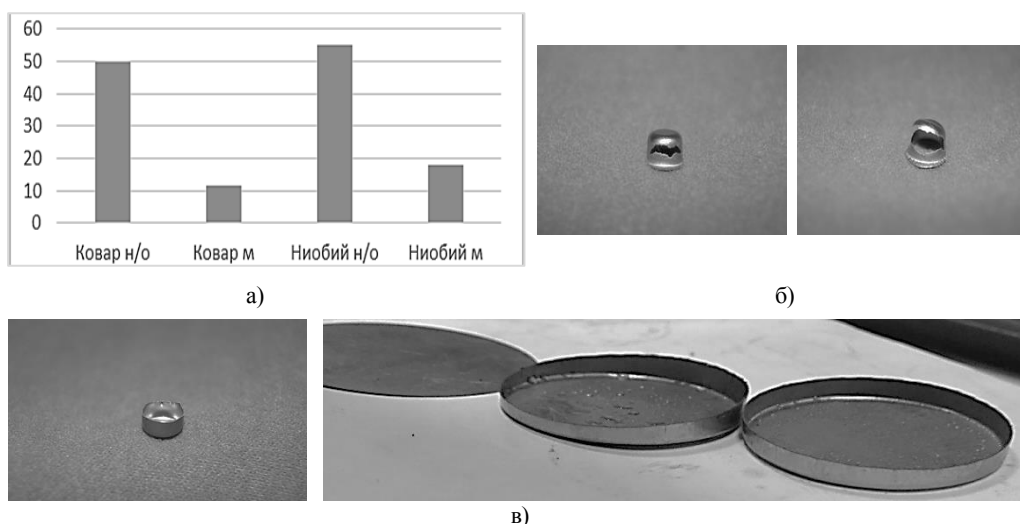


Рис. 3. Результаты модификации фторорганической нанокomпозицией
а – свободная поверхностная энергия материалов до и после нанесения активного смазочного покрытия;
б – детали до модификации инструмента; в – полуфабрикаты свертки ниобия и молибдена

Таблица 3

Результаты измерения поверхностной энергии тугоплавких материалов до (н/о) и после (м) модификации

Материал	Краевой угол, град		Поверхностная энергия, мН/м
	Вода	Бромнафталин	
Ковар н/о	59,04	23,22	49,9
Ковар м	117,89	88,84	11,44
Ниобий н/о	50,75	19,08	54,97
Ниобий м	107,85	73,62	18,12

Комплекс физико-механических свойств тугоплавких материалов в технологии их изготовления оказывает влияние на формирование остаточных напряжений в процессе штамповки. По классификации Давиденкова остаточные напряжения подразделяют на 3 рода: 1 – действующие в объеме всего тела (макроскопические), 2 – действующие в объеме сравнимом с размером зерна (микроскопические), 3– действующие в размерах, сравнимых с размером атомно-кристаллической решетки. Проведенные эксперименты и анализ литературы позволил авторам предположить, что причинами возникновения брака на операциях штамповки тугоплавких металлов являются остаточные напряжения. Механизм действия активного смазочного покрытия заключается в параллельно протекающих процессах химической очистки поверхности металлов или сплавов от продуктов коррозии и восстановления и упрочнении поверхности за счет окислительно-восстановительных, электрохимических и диффузионных процессов, протекающих при взаимодействии композиционных составов с металлической поверхностью. Одновременное уменьшение коэффициента трения до минимальных значений (менее 0,01) происходит за счет образования промежуточного слоя сложного химического состава, одновременно уменьшающего дальнейший износ поверхности и исключается адгезия с полуфабрикатом ниобия (молибдена) в процессе вытяжки, тем самым блокируются процессы приводящие к образованию остаточных напряжений на поверхности полуфабриката за счет снижения адгезии. Предполагаем, что блокируется возможность образования остаточных напряжений 3-го рода, после чего отжиг не требуется. Применение модификации инструмента позволило полностью исключить операции межоперационного отжига, а также внедрить в технологию комбинированную вытяжку через 2 матрицы за счет снижения трения и адгезии с инструментом.

Библиографический список

1. *Погодин-Алексеев Г. И.* О хрупком и вязком состояниях металлов // *Металловедение и термическая обработка.* 1965. № 8.
2. Молибден. Пер. с англ. Сб. статей под ред. А. К. Натансона. М.: изд-во Иностранной литературы, 1962.
3. *Клытин Б. А.* Температурная зависимость механических свойств молибдена, ниобия и никеля // Сб. трудов ЦНИИЧермет. 1965. Вып. 39.
4. *Богоявленский К. Н., Рус В. В.* Исследование механических свойств и деформируемости молибдена и ниобия // Сб. трудов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого. 1967. №282.
5. *Лобов В. А., Олехвер А. И., Ремшев Е. Ю.* Разработка технологии изготовления тонкостенных дисковых электродов для резонансных разрядников // *Известия ТулГУ. Технические науки.* Вып. 11: в 3-х ч. Ч.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 119 – 125.
6. *Белов А. В., Агошков О. Г., Путиев К. А* и др. Патент РФ № 2384600, МПК C09D. Антифрикционная композиция, обладающая антиадгезионными и антикоррозийными свойствами, способ получения антифрикционного покрытия и применение композиции. № 2008103241/04; заявл. 01.02.2008; опубл. 20.03.2010, Бюл. №8.