

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 13-22.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 13-22.

Научная статья

УДК 621.793.6

doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-13-22

Физико-технологические основы повышения стойкости штампового инструмента упрочнением высокоэнергетическими потоками

Валерий Александрович Лебедев¹, к.т.н.

Андрей Николаевич Кочетов², к.т.н.

Виктор Александрович Науменко³, аспирант

^{1, 2, 3} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ va.lebedev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

² ankochetow@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8904-8638>

³ viktor28021999@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0661-8114>

Аннотация. Рассмотрены вопросы формирования условий равновесия в упорядоченных дислокационных структурах, полученных посредством воздействия высококонцентрированных потоков электрической энергии и неформального (продольно-крутильного) ультразвукового поля на токопроводящий материал подложки. Показано влияние твердых поверхностных пленок на деформацию и разрушение, которые выступая в роли преграды, способны подавлять возникновение новых дислокаций в ходе деформационных процессов металлов. Установлены факторы, которые в большей степени определяют эффективность пленки в создании барьера для дислокаций. Предложена упрощенная аналитическая модель взаимодействия единичной дислокации с полученными методом комбинированного упрочнения слоями и условия равновесия дислокаций в пленке заданной толщины. Представлены результаты экспериментальных исследований упрочнённого слоя, сформированного при анодировании вольфрамом и медью на стали марки 20, которые показали, что увеличение прочности изделия происходит в условиях, когда модуль сдвига кристалла-основы меньше модуля сдвига напыленного слоя, и сила, действуя со стороны этого слоя, стремится оттолкнуть дислокацию от границы раздела фаз. В результате исследования влияния процесса электроакустического напыления на качество и износостойкость поверхности штампового инструмента подтверждено, что электроакустическое напыление, реализуя сложное воздействие на металл, обеспечивает повышение качества кромок инструментов и их прочностных характеристик, формируя прогнозируемую организацию структуры поверхностного слоя; создаваемый, в процессе электроакустического напыления, на поверхности «двойной барьер», препятствующий выходу дислокаций на поверхность, является, основным фактором повышения прочностных свойств инструмента. Установлено, что покрытие, нанесенное электроакустическим методом, увеличивает ресурс работы в 1,5 – 2 раза по отношению к образцам, поверхность которых не обрабатывалась вышеупомянутым методом.

Ключевые слова: дислокационные структуры, высокоэнергетические потоки, упрочнённый слой, электроакустическое напыление, качество, износостойкость, формообразующий инструмент

Для цитирования: Лебедев В.А., Кочетов А.Н., Науменко В.А. Физико-технологические основы повышения стойкости штампового инструмента упрочнением высокоэнергетическими потоками // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 7 (169). С. 13–22. doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-13-22

Physico-technological foundations of increasing the durability of die tools by hardening with high-energy flows

Valery A. Lebedev¹, PhD Eng.

Andrey N Kochetov², PhD Eng.

Viktor A. Naumenko³, PhD student

^{1, 2, 3} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ va.lebedev@yandex.ru

² ankochetow@yandex.ru

³ viktor28021999@yandex.ru

Abstract. The issues of the formation of equilibrium conditions in ordered dislocation structures obtained by the action of highly concentrated electric energy fluxes and an informal (longitudinal-torsional) ultrasonic field on a conductive substrate material are viewed. The effect of solid surface films on deformation and fracture, being used as barriers and capable of suppressing the occurrence of new dislocations during metal deformation processes, is shown. The factors that determine to a greater extent the effectiveness of the film in creating a barrier for dislocations have been identified. A simplified analytical model of the interaction of a single dislocation with the layers obtained by the combined hardening method and the conditions for the equilibrium of dislocations in a film of a given thickness are proposed. The results of experimental studies of a hardened layer formed by anodizing with tungsten and copper on grade 20 steel are presented. They have shown that an increase in product strength occurs under conditions when the shear modulus of the base crystal is less than the shear modulus of the sawn layer, and the action force from this layer tends to push the dislocation away from the phase interface. As a result of the study of electroacoustic spraying effect on the quality and wear resistance of the surface of a die tool, it was confirmed that electroacoustic spraying, realizing a complex effect on metal, improves the quality of tool edges and their strength characteristics, forming a predictable organization of the surface layer structure; a "double barrier" created during electroacoustic spraying on the surface, preventing the release of dislocations on the surface is the main factor in increasing the strength properties of the tool. It was found that the coating applied by the electroacoustic method increases the service life by 1,5 – 2 times if compared to samples where surface was not treated by the above-mentioned method.

Keywords: dislocation structures, high-energy flows, reinforced layer, electroacoustic spraying, quality, wear resistance, form tool

For citation: Lebedev V.A., Kochetov A.N., Naumenko V.A. Physico-technological foundations of increasing the durability of die tools by hardening with high-energy flows / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 7 (169). P. 13–22 doi: 10.30987/2223-4608-2025-7-13-22

Введение

Проблема увеличения ресурса работы формообразующего инструмента наиболее остро стоит как перед отечественным, так и зарубежным производителем машиностроительной продукции. Наиболее эффективное решение этой проблемы видится в использовании современных упрочняющих технологий, основанных на применении высококонцентрированных источников энергии и изменении физико-химических свойств материалов, обеспечивающих упорядочение дислокационных структур материалов.

Стоит отметить, что использование в процессе комбинированного упрочнения комплексного источника мощного ультразвукового поля можно назвать одним из наиболее перспективных направлений в формировании упорядоченных дислокационных структур. Данный метод получения износостойких защитных покрытий основан на комплексном взаимодействии высококонцентрированных источников электрической энергии и продольно-крутильного ультразвукового поля, при комбинированном методе упрочнения протекают достаточно сложные и неоднозначные физико-химические процессы, и явления,

поэтому возникает необходимость исследовать их более углубленно и детально.

Стимулирование развития научных и прикладных работ в данной области может произойти при получении упорядоченных дислокационных структур, путем использования комбинации воздействующих сил: электрическая искра и мощное сложное (продольно-крутильное) ультразвуковое поле в металлах.

Влияние твердых поверхностных пленок на деформацию и разрушение

Исследование учеными влияния твердых поверхностных пленок на изменения кристаллов, при воздействии нагрузки, началось с 1934 г., когда Росски, в результате своих наблюдений, отметил, что толщина окисной пленки менее двадцати атомных слоев может более чем на 50 % увеличить критическое напряжение сдвига монокристаллов кадмия. Многочисленные эксперименты, проведенные с использованием различных кристаллов-основ и поверхностных пленок (как окисных [1, 2], так и металлических [3]) подтвердили в большинстве случаев обнаруженный Росски эффект. Оказалось, также, что поверхностные пленки значительно уменьшают скорость

ползучести монокристаллов [4]. Характерно, что влияние поверхностной пленки проявляется уже на самых ранних стадиях деформации.

Смещение кривой напряжение – деформация в сторону более высоких напряжений невозможно объяснить на основании предположения о простом распределении нагрузки между кристаллом-основой и пленкой, так как вычисленная прочность пленки, необходимая для такого увеличения напряжения течения, невероятно велика. Следовательно, к изменению механических свойств кристалла, составляющего основу, приводит наличие поверхностной пленки.

В ходе нашего исследования, соответствующего имеющимся научным данным, было выявлено три механизма, способствующих упрочнению материалов. Первый механизм заключается в образовании поверхностного кристаллического слоя сплавов, который служит основой для последующего упрочнения. Второй механизм реализуется за счёт фиксации источников Франка-Рида на поверхности. Третий механизм, обладающий наибольшей научной ценностью, заключается в блокировке дислокаций, что затрудняет их выведение на поверхность кристаллической основы и значительным образом замедляет процессы скольжения.

Анализ кристаллических структур цинка с медными покрытиями продемонстрировал отсутствие значительного легирования внешнего слоя. Рентгенодифракционные эксперименты, проведенные на пленочных и непленочных образцах цинка, продемонстрировали максимальные деформации образцов, имеющих медную оболочку [5]. Это наблюдение даёт основание полагать, что пленка исполняет защитные функции, препятствуя выходу дислокаций на поверхность. Если бы медная пленка выступала в роли полноценного барьера для дислокаций, искажения в пленочных образцах должны были бы иметь меньшую величину. Тем не менее, с увеличением количества дислокаций, возникающих под пленкой, возрастает степень искажения в основном слое кристаллического образца. Эффект барьерного воздействия, осуществляемого покрытиями, дополнительно подтверждается измерениями внутренних трений цинковых образцов с

окисной пленкой [6]. Это явление не исчерпывается лишь блокировкой дислокационных источников на поверхности.

Следовательно, пленка, выступая в роли преграды, способна подавлять возникновение новых дислокаций в ходе деформационных процессов металлов.

Далее рассмотрим факторы, которые в большей степени определяют эффективность пленки в создании барьера для дислокаций.

Взаимодействие единичной дислокации с поверхностной пленкой

Дислокации, которые содержатся в твердом теле, значительно подвергаются влиянию, в границах разделов фаз, при наличии различных упругих свойств. Для того, чтобы добиться силы, которая будет стремиться изменить характер дислокаций, и, как следствие, повлиять на упругую энергию тела, необходимо придерживаться на поверхностях раздела фаз граничных условий. В случае, если оптимальные условия были достигнуты, можно существенно влиять на процессы создания упругих деформаций дислокациями.

Обратимся к исследованию условий взаимодействия полубесконечно толстой пленки с единственной дислокацией. Модуль сдвига, имеющийся у кристалла-основы, представим как G_1 , который будет расположен от границы раздела фаз ($0 < x < \infty$) справа. А модуль сдвига, имеющийся у «пленки», обозначим как G_2 и будет расположен от границы раздела ($-\infty < x < 0$) слева. Параллельно границе «пленка-кристалл», расположена бесконечная винтовая дислокация (рис. 1), где l – расстояние от границы в кристалле-основе, а b^2 (где b – вектор Бюргерса) является мощностью.

Для определения силы воздействия пленки на дислокацию следует провести сопоставление напряжения, создаваемого винтовой дислокацией в среде с изменяющимися упругими характеристиками, и модели линейного заряда в неоднородной среде, проанализированной в рамках электростатики. Данная аналогия была всесторонне изучена Эшелби.

При активном взаимодействии между двумя фазами считается, что в зоне раздела

величины напряжения остаются постоянными. (т.е. при $x = 0$).

Показать, что условия будут легко осуществимы [7], возможно, когда мы поместим дислокацию «изображения» мощностью Kb^2 , где $K = \frac{(G_2 - G_1)}{(G_2 + G_1)}$, в точку: $-l, 0$.

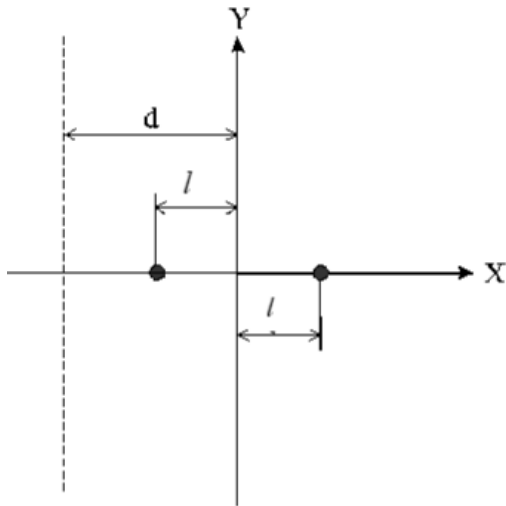


Рис. 1. Сила, действующая на дислокацию со стороны границы «пленка-кристалл»

Fig. 1. Force acting on dislocation from the film-crystal boundary

Изучение взаимодействия одной дислокации с отражённой в плоскости раздела дислокацией охватывает силу, воздействующую на обе структуры т.е.

$$F = \frac{G_1 K b^2}{4l\pi}. \quad (1)$$

При достижении напряжением определённого уровня осуществляется движение дислокации в направлении границы $G_2 > G_1$, ($K > 0$). В случае несоответствия условий движения происходит отталкивание от границы $G_2 < G_1$, ($K < 0$). Следует отметить, что при более низкой жесткости пленки в наблюдаемых материалах дислокация проявляет притяжение к границе. При высоком уровне жесткости пленки при этом наблюдается отталкивание. Имеет также значение, что при соприкосновении кристаллической решётки с вакуумом дислокация демонстрирует притяжение, тогда как под влиянием напряжения может быть вытолкнута на поверхность ($G_2 = 0$, $K = -1$).

При исследовании пленки заданной толщины, обозначенной пунктирной линией на рис 1, акцентируем внимание на бесконечном ряде дислокаций, маркированный как $-l, -(l + 2d), -(l + 4d), -(l + 6d)$, и так далее, характеризующийся установленными мощностями и $K, -(1 - K^2), -(1 - K^2) \cdot K, -(1 - K^2) \cdot K^2, \dots$. Данная мера служит для поддержания граничных условий [7]. С целью анализа взаимодействия пленки с реальной дислокацией производится вычисление объединённого воздействия сил, возникающих от бесконечного ряда «изображающих» дислокаций, на реальную дислокацию.

$$F = \frac{G_1 K b^2}{4l\pi} \cdot \left\{ 1 - (1 - K^2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} K^{n-1} \frac{\alpha}{\alpha + n} \right\}, \quad (2)$$

где $\alpha = l/d$.

Если проанализировать формулу (2), можно установить, что всегда будет притягиваться к границе дислокация, когда пленка мягче, чем кристалл ($K < 0$). Если рассматривать противоположный случай, когда $K > 0$, то ситуация неоднозначная: дислокация будет притягиваться к пленке на больших расстояниях ($l \ll d, \alpha \ll 1$), на маленьких, наоборот, наблюдается отталкивание ($l \ll d, \alpha \ll 1$). Следовательно, на некотором расстоянии l_0 сила «изображения» равна

нулю, т.е. дислокация, находится в состоянии устойчивого равновесия, которое можно определить, приравняв нулю выражение (2).

Формулы, которые точно описывают взаимодействие краевой дислокации с границами раздела фаз, являются более сложными, чем для винтовой дислокации [8, 9]. Однако, в случае «толстой пленки», приблизительно можно выразить формулой (1) силу взаимодействия краевой дислокации с границей. Максимальная ошибка при этом не превышает

15 % [7]. Точное решение для случая пленки конечной толщины [9, 10] позволяет определить положение равновесия краевой дислокации, которое оказывается ближе к границе, чем для винтовой дислокации. Это различие возрастает с увеличением отношения G_2/G_1 .

В предыдущем исследовании изучались модули сдвига на границе между кристаллом и пленкой. В данном случае не наблюдалось формирования соединений либо твердых растворов, а обнаруживался лишь разобобщенный слой. При этом модули сдвига демонстрировали однородные значения. В дальнейшем акцентируем внимание на двух других механизмах. В частности, существует вероятностное образование соединения на границе пленки с кристаллом, обладающего характерным значением модуля сдвига. При наличии растворимого компонента в пленке, переходящего к кристаллической фазе, диапазон модуля сдвига будет изменяться от G_1 до G_2 на всей границе раздела.

Упрощенная аналитическая модель взаимодействия единичной дислокации с полученными слоями методом комбинированного упрочнения

Современные исследования сосредоточены не на теоретических аспектах прочностных технологий, а на разработке практических методик и прогнозировании эксплуатационных характеристик покрытий, способствующих упрочнению конструктивных элементов.

Сложившаяся ситуация может приводить к непониманию процессов упрочнения, сопутствующих им явлений, вследствие необоснованного игнорирования глубоких исследований этих физических явлений с опорой на фундаментальные науки. Рассуждая о утилитарных и прагматичных взглядах, логично, что

акцент смещается на разработки прикладных вопросов, но стоит также отметить, что в использовании общих физических подходов, модельных представлений применительно к явлениям, которые сопутствуют процессам упрочнения, трения и изнашивания, имеются объективные трудности. Возникающие вопросы и проблемы по увеличению прочности материалов приходится решать на инженерном уровне из-за плохо развитого математического аппарата.

Объективно оценивать эффективность различных технологий упрочнения не представляется возможным, так как математические модели процессов упрочнения отсутствуют. Они, в свою очередь, могли бы учитывать стохастический характер протекания сопутствующих явлений.

Двойной барьер, который создается методом комбинированного упрочнения, препятствует выходу дислокаций на поверхность. Эффект, который обнаружил Росски, был подтвержден рядом экспериментов, которые были проведены с использованием различных кристаллов-основ и наносимых поверхностных слоев (окисных [1, 2], металлических [3]) и подтверждают вывод о барьерном механизме. На основании вышеизложенного материала предлагаем ознакомиться с упрощенной аналитической моделью взаимодействия единичной дислокации с получаемыми слоями методом комбинированного упрочнения (рис. 2).

Теперь проанализируем обстоятельства, при которых появляется соединение с модулем сдвига на границе между пленочным слоем и металлической основой.

Если ограничиться случаем «толстого слоя», то сила, действующая на дислокацию в металле со стороны промежуточного слоя толщиной d , имеющая модуль сдвига G_3 , равна

$$F_2 = \frac{G_1 \cdot b^2 \cdot K_{31}}{4l\pi} \cdot \left\{ 1 - (1 - K_{31}^2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-K_{23}) \cdot K_{31}^{n+2} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + n} \right\}, \quad (3)$$

где $K_{ij} = (G_i - G_j)/(G_i + G_j)$.

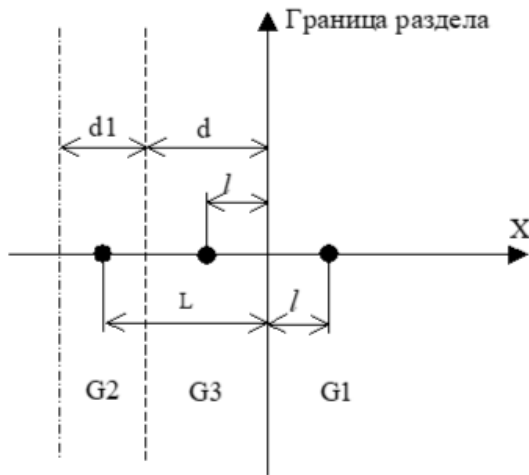


Рис. 2. Единичная дислокация вблизи границы раздела «напыленный слой-металл»:

G_1 – модуль сдвига материала упрочняемого образца
 G_2 – модуль сдвига напыленного слоя; G_3 – модуль сдвига пластически деформированного слоя; d – толщина пластически деформированного слоя; d_1 – толщина напыляемого слоя; l – расстояние от дислокации до границы раздела; L – расстояние от дислокации изображения напыленного слоя до границы раздела.

Fig. 2. A single dislocation near the "sprayed layer-metal" interface:

G_1 – the shear modulus of the material of the hardened sample; G_2 – the shear modulus of the sprayed layer; G_3 – the shear modulus of the plastically deformed layer; d – the thickness of the plastically deformed layer; d_1 – the thickness of the sprayed layer; l – the distance from the dislocation to the interface; L – the distance from the dislocation of the image of the sprayed layer to the interface.

В зависимости от соотношения модулей сдвига сила «изображения» имеет различный характер.

Используя принцип суперпозиции, можно говорить о том, что результирующая сила, действующая со стороны полученных слоев на дислокацию в металле, определяется как сумма сил, приложенных к ней:

$$\bar{F}_p = k\bar{F}_1 + \bar{F}_2, \quad (4)$$

где $k \approx l/L$.

Упорядоченные дислокационные структуры: условия равновесия

Перед тем как рассмотреть способы снижения напряжений, вызванных блокировкой слоя, необходимо проанализировать характер распределения данных напряжений, учитывающих толщину и жесткость пленки, сформированной комбинированным упрочнением.

Представим, что в кристаллической решетке n наблюдаются параллельные винтовые дислокации, расположенных на оси x в точках $x_1, x_2, \dots, x_n$. При приложении касательного напряжения τ к решетке дислокации начинают смещение в сторону границы фаз. Рассмотрим полубесконечное плоское пространство: дислокации в модели взаимодействуют с «изображениями», расположенными с противоположной стороны. В статическом равновесии силы, действующие на каждую дислокацию со стороны остальных, компенсируются внешними напряжениями [1]. Основываясь на изложенном материале, возможно сформулировать систему уравнений, позволяющую определять оптимальные расположения дислокаций.

$$\frac{G_1 b}{2\pi} \left\{ \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{1}{x_j + x_i} + K \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_j + x_i} \right\} = \tau, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где G_1 – модуль сдвига подложки; $K = (G_2 - G_1)/(G_2 + G_1)$; G_2 – модуль сдвига плёнки; b – модуль вектора Бюргерса; τ – напряжение.

Первая система уравнений представляет собой напряжение, действующее на дислокацию, расположенную в точке x_j , со стороны $n-1$ реальных дислокаций, находящихся в точках x_i , вторая – напряжение, обусловленное рядом n дислокаций изображения мощностью Kb^2 , размещенных в точках $-x_j$.

С увеличением жесткости пленки равновесные положения дислокаций смещаются дальше от границы раздела фаз.

При наличии значительных величин n стандартные численные методы демонстрируют снижение эффективности. В подобной ситуации возможно применение приближенных методов, основанных на использовании непрерывно распределенных дислокаций [2]. Условие равновесия в этом контексте записывается следующим образом:

$$\int \frac{f(t)dt}{x-t} + K \int_0^L \frac{f(t)dt}{x+t} = \frac{2\pi\tau}{G_1b}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (6)$$

где L – площадь области сосредоточения; $f(t)$ – неустановившаяся функция распределения дислокаций.

Интеграл воспринимается как интеграл Коши. Решая интегральное уравнение (6), устанавливаем функцию распределения $f(t)$, нужную для вычисления числа дислокаций в скоплении и связанного с ним напряжения.

Количество дислокаций, а также их размещение внутри поликристаллических структур в значительной степени определяют процесс формирования полосы скольжения. При высокой степени точности величину возможно представить линейной зависимостью:

$$\left(\frac{2\pi\tau}{G_1b}\right) \cdot \frac{L}{n} \approx 2 + (\pi - 2) \cdot K. \quad (7)$$

Зависимость касательного напряжения на плоскости скольжения $y = 0$ в пленке от расстояния до границы для различных значений K (головная дислокация лежит на границе) представлена на рис. 1. Гомогенной среде соответствует значение $K = 0$, с увеличением жесткости пленки τ_{yz} падает.

Для случая пленки конечной толщины d , условие равновесия дислокаций запишется в следующем виде

Условия равновесия дислокаций в пленке заданной толщины d можно записать следующим образом:

$$\frac{G_1b}{2\pi} \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_j+x_i} + K \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_j+x_i} - \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(1-K^2) \cdot K^{v-2}}{x_j+x_i+2v d} \right] \right\} = \tau, \quad (8)$$

где $j = 1, 2, \dots, n$; v – коэффициент Пуассона.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований применялась электронная микроскопия, в частности, с использованием РЭМ «Камебакс-микро». В процессе исследования использовались микрозонд, вторичные электроны и методы оценки поглощающего тока. Анализ среза упрочнённого слоя выявил неравномерное распределение химических элементов.

В ходе работы осуществлён анализ упрочнённого слоя, формирующегося при анодировании вольфрамом и медью на стали марки 20. Распределение компонентов в упрочнённом слое, образованном анодами из вольфрама и меди представлено на рис. 3. Исследование качества подтвердило неравномерное распределение элементов в слое, зависящее от его толщины.

В верхней области слоя и его стыковом участке с матрицей отмечается низкий уровень

железа, тогда как кобальт в основном обнаруживается в центральной области слоя. Добавки меди, хоть и в скромных объемах, выявляются на верхних поверхностях.

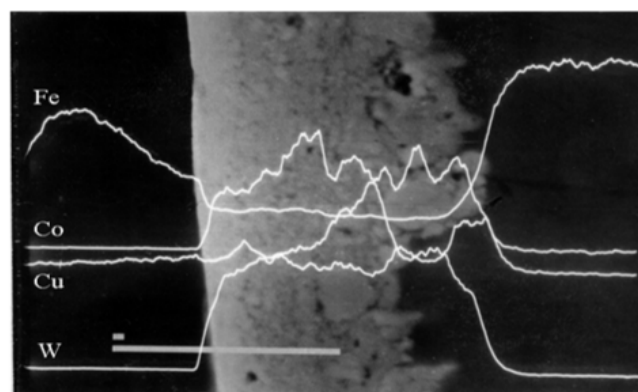


Рис. 3. Распределение элементного состава в напылённом слое (маркерная метка соответствует 10 мкм)

Fig. 3. The distribution of the element composition in the sprayed layer (the marker corresponds to 10 microns)

Опираясь на теоретические и экспериментальные данные воздействия поверхностных пленок G_2 / G_1 на расстановку дислокационных структур, возникновение которых связано с комбинированным упрочнением, можно сформулировать несколько заключений. Исследования свидетельствуют о том, что при увеличении коэффициента Пуассона схемы взаимодействия пленки и кристаллической решётки наблюдается снижение плотности краевых дислокаций. При этом с ростом модуля пленки при неизменном уровне приложения напряжения фиксируется сокращение количества дислокаций, сосредоточенных в определённых участках.

Следовательно, жёсткая оболочка препятствует образованию пластической деформации в кристаллических структурах, повышая их сопротивляемость внешним воздействиям по сравнению с кристаллами, не обладающими подобной защитой, при условии, что путь, пройденный дислокациями, сохраняет значительную длину.

Среди наиболее убедительных теорий объяснения упрочнения кристаллической структуры выделяется концепция поверхностных пленок. Эти пленки существенно влияют на процесс, ограничивая выход дислокаций на поверхности кристаллов. Они проникают в кристаллическую структуру и располагаются в строго заданной последовательности, значительно усложняя скольжение и приводя к упорядочиванию дислокационных структур.

Увеличение прочности наблюдается, когда модуль сдвига основного кристалла меньше модуля сдвига нанесенного слоя. В этом случае сила со стороны наложенного слоя сдерживает движение дислокаций к границе раздела фаз.

Увеличение прочности изделия происходит в условиях, когда модуль сдвига кристалла-основы меньше модуля сдвига напыленного слоя, и сила, действуя со стороны этого слоя, стремится оттолкнуть дислокацию от границы раздела фаз.

Экспериментальные исследования по влиянию процесса электроакустического напыления на качество и износостойкость

поверхности штампового инструмента проводились на образцах отработанных инструментов (рис. 4, 5).

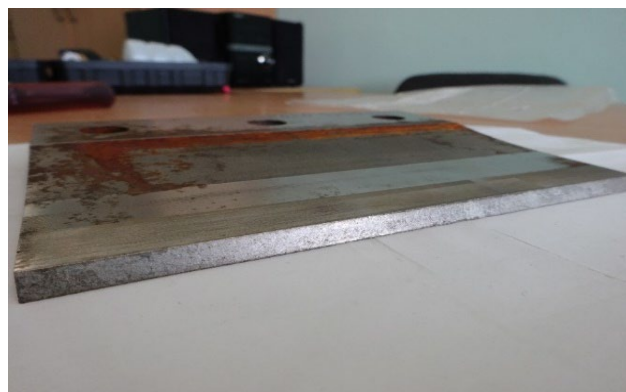


Рис. 4. Профиль ножа

Fig. 4. Knife profile

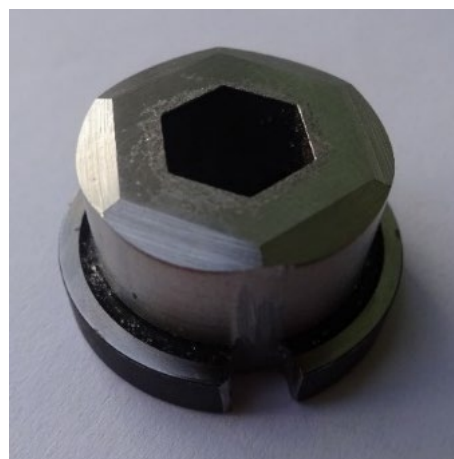


Рис. 5. Пуансон обрезной

Fig. 5. Trimming punch

Для нанесения электроакустического напыления использовалось разработанное в ДГТУ экспериментальное устройство. Образцы ножей и пуансонов были обработаны согласно матрице планирования эксперимента, для режимов напыления, где имелись, как максимальные, так и минимальные значения. Поверхности ножа были разбиты на четыре группы с различным изменением факторов. Для обеспечения максимальной эффективности упрочнения изделий напыление осуществлялось на переднюю и заднюю кромки образцов инструмента.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Электроакустическое напыление, реализуя сложное воздействие на металл, обеспечивает повышение качества кромок инструментов и их прочностных характеристик, формируя прогнозируемую организацию структуры поверхностного слоя.

2. Создаваемый, в процессе электроакустического напыления, на поверхности «двойной барьер», препятствующий выходу дислокаций на поверхность, является, основным фактором повышения прочностных свойств инструмента.

3. Изучение микроструктуры и фазового состава упрочненного слоя для всех режимов напыления выявило стойкую тенденцию к возникновению, как сжимающих микронапряжений второго рода, так и ОКР, вызванных измельчением блоков. При упрочнении подложки из высоколегированной стали анодом из твердого сплава получается слой с характерным послойным строением, отличающийся высокой дисперсностью аустенитного зерна и первичных карбидов, а также химическими соединениями на базе нитридов, оксидов, интерметаллидов, что в сочетании с высокой скоростью кристаллизации подтверждает выдвинутую нами теоретическую гипотезу «двойного барьера», препятствующего выходу дислокаций на поверхность.

4. Увеличение физического уширения пиков и их размытость, установленное на дифрактограммах при рентгеноструктурном анализе свидетельствуют об увеличении плотности дислокаций в подслое, что подтверждает выводы теоретической части.

Экспериментальные исследования получаемых характеристик качества поверхностного слоя, а именно микротвердости и шероховатости, позволили установить их зависимость от основных режимов напыления: напряжения, подводимого к электроду; амплитуды УЗК; усилия прижима и подачи. Установлено, что наиболее сильное влияние на микротвердость поверхностного слоя оказывает напряжение, подводимое к электроду, и амплитуда УЗК, а на шероховатость – амплитуда УЗК и подача:

Микротвердость получаемого поверхностного слоя возрастает в 1,5 – 4 раза в зависимости от режима обработки. Шероховатость остается без изменений, либо увеличивается незначительно в зависимости от режима обработки, при этом продольная и поперечная шероховатости одинаковы.

Проведенные экспериментальные исследования влияния оптимального режима напыления на основные механические характеристики позволили установить, что:

- нагрузка, соответствующая пределу текучести для напыленных образцов, увеличивается на 6,5 % по отношению к ненапыленным;
- нагрузка, соответствующая пределу прочности, увеличивается на 35,5 %;
- средняя относительная деформация после разрыва уменьшается на 12 %.

Выводы

Изменение основных механических характеристик подтверждает положительное влияние барьерно-дислокационного механизма упрочнения. Получены основные параметры изнашивания, позволяющие отнести детали, подвергнутые электроакустическому напылению, к восьмому классу износостойкости (по Крагельскому).

Установлено, что покрытие, нанесенное электроакустическим методом, увеличивает ресурс работы в 1,5 – 2 раза по отношению к образцам, поверхность которых не обрабатывалась выше упомянутым методом. Для обеспечения максимальной эффективности износостойкости для пунсонов необходимо дополнительно производить операцию притупления режущих кромок материала с последующим напылением износостойкого защитного покрытия методом электроакустического напыления с напряжением $U = 25$ В и амплитудой 6...10 мкм. Для ножей оптимальные режимы нанесения покрытия должны быть установлены: импульсное напряжение $U = 45$ В, амплитуда колебаний акустической системы 12...15 мкм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E.N. da C. Andrade, C. Henderson. Phil. Trans., 244A, 177, 1981.
2. J.J. Gilman. Inst. Min. a. Metall. Engrs., 191, 1148, 1981.
3. M. P. Piskus, E.R. Parker. Trans. Amer. Inst. Min. a. Metall. Engrs., 191, 792, 1990.
4. J.J. Gilman. Amer. Soc. Test. Mater., Spec. Techn. Publ. №171, 3, 1985.
5. S. Shapiro, T.A. Read. Phys. Rev., 82, 341, 1991.
6. Самарский А.А., Выбещевич П.Н. Вычислительная теплопередача., М., УРСС, 2003.
7. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М.; МИСИС, 2015.
8. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2000.
9. Козаков А.Т., Зволинский А.С., Шмалько С.Г. Влияние режимов и времени легирования на толщину и химический состав покрытий при электронном легировании стали 20 сплавом ВК-8 // Электронная обработка материалов. № 2. 2018.
10. Быстрозакалённые металлические материалы. Материалы V международной конференции / под ред. Штиба С., Варлимонта Г., пер с англ. / под ред. Ковнеристого Ю.К., М.: Металлургия, 2009.

REFERENCES

1. E.N. da C. Andrade, C. Henderson. Phil. Trans., 244A, 177, 1981.
2. J.J. Gilman. Inst. Min. a. Metall. Engrs., 191, 1148, 1981.
3. M. P. Piskus, E.R. Parker. Trans. Amer. Inst. Min. a. Metall. Engrs., 191, 792, 1990.
4. J.J. Gilman. Amer. Soc. Test. Mater., Spec. Techn. Publ. № 171, 3, 1985.
5. S. Shapiro, T.A. Read. Phys. Rev., 82, 341, 1991.
6. Samarskiy A.A., Vibeshevich P.N. Computational Heat transfer, Moscow, URSS, 2003.
7. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. Radiographic and electron-optical analysis. Moscow; MISIS, 2015.
8. Gusev A.I., Rempel A.A. Nanocrystalline materials. Moscow: Fizmatlit, 2000.
9. Kozakov A.T., Zvolinsky A.S., Shmalko S.G. Influence of alloying modes and times on the thickness and chemical composition of coatings during electronic alloying of steel 20 with VK-8 alloy. Electronic processing of materials. no. 2. 2018.
10. Fast-quenched metal materials. Proceedings of the V-th International Conference / ed. Shtiba S., Varlimonta G., translated from English/ ed. Kovneristogo Yu.K., Moscow: Metallurgiya, 2009.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.04.2025; одобрена после рецензирования 27.04.2025; принята к публикации 14.05.2025.

The article was submitted 20.04.2025; approved after reviewing 27.04.2025; assepted for publication 14.05.2025.