



УДК 621.357.8: 62-1/-9
ГРНТИ 55.21.99: 30.19.57

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГАЛЬВАНИЧЕСКОМ КОМПОЗИТНОМ ПОКРЫТИИ С УЧЕТОМ ТЕОРИИ ДИСЛОКАЦИЙ

*С.Ю. ЖАЧКИН, доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)
Н.А. ПЕНЬКОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
М.Н. КРАСНОВА, кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)
С.Н. ЯЦЕНКО, кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)*

Статья посвящена уточнению аналитического расчета напряженно-деформированного состояния слоя композитного покрытия, учитывающего характер размножения и движения дислокаций, с целью более точного прогнозирования эксплуатационных свойств покрытия, обеспечивающего увеличение долговечности и снижение себестоимости восстановленных деталей и узлов авиационной техники. Определены силы, которые нужно преодолеть в процессе пересечения. Разработаны аналитические выражения, позволяющие определять напряженно-деформированное состояние гальванического композитного покрытия и, как следствие, прогнозировать его физико-механические и эксплуатационные свойства.

Ключевые слова: композитное покрытие, дислокации, упрочнение, восстановление, напряжение.

TENSIONS DETERMINATION IN A GALVANIC COMPOSITE COATING TAKING INTO ACCOUNT THE DISLOCATION THEORY

*S.YU. ZHACHKIN, Doctor of Technical sciences, Professor
Voronezh State Technical University (Voronezh)
N.A. PENKOV, Candidate of Technical sciences
MESCAF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
M.N. KRASNOVA, Candidate of Technical sciences, Associate Professor
Voronezh State Technical University (Voronezh)
S.N. YATSENKO, Candidate of Physico-Mathematical sciences, Associate Professor
Voronezh State Technical University (Voronezh)*

This work is devoted to refining the analytical calculation of the tension-strain state of the composite coating layer, taking into account the nature of propagation and movement of dislocations, in order to more accurately predict the performance properties of the coating, which provides increased durability and reduced cost of restored parts and components of aviation equipment. The forces that need to be overcome in the process of crossing are determined. Analytical expressions have been developed that allow determining the stress-strain state of a galvanic composite coating and, as a result, predicting its physical, mechanical and operational properties.

Keywords: composite coating, dislocations, hardening, recovery, tension.

Введение. Одним из перспективных направлений восстановления деталей гидроприводов авиационной техники является применение композиционных гальванических покрытий. Введение наполнителей в гальваническую матрицу позволяет значительно изменять



потребительские свойства материала и, как правило, существенно уменьшать его стоимость. Это создает основу для разработки технологических процессов восстановления, обеспечивающих дальнейшее повышение долговечности гидравлических узлов и снижение затрат на ремонт военной техники [1]. Однако, присутствие инородных тел в гальванической матрице вызывает нарушение кристаллической решётки твёрдого тела и ведет к появлению дислокаций при его деформировании. Деформационные процессы в твердом теле ведут к возникновению дислокаций и их перемещению внутри определенного объема, ограниченного размерами тела [1, 2].

Актуальность. В условиях, когда основным механизмом пластической деформации кристаллов является движение дислокаций, для протекания деформации необходимо либо перемещение уже имеющихся в кристалле дислокаций, либо возникновение новых. Процесс зарождения дислокаций определяет развитие пластической деформации в том случае, когда дислокации отсутствуют или они малоподвижны (например, вследствие закрепления примесями). В большинстве же реальных кристаллов, как правило, уже имеются подвижные дислокации, и вопрос о начале пластической деформации по существу сводится к вопросу о сопротивлении данного кристалла движению отдельных дислокаций. При дальнейшем деформировании кристалла происходит уже не только перемещение исходных дислокаций, но и их размножение, приводящее к появлению новых дислокаций, которые в свою очередь также могут принимать участие в процессе деформации [1–3].

Эгон Орован был первым, кто описал механизм пластической деформации кристаллов как динамический процесс и предложил уравнение, связывающее скорость пластического течения с плотностью ρ_m и скоростью v подвижных дислокаций, а также с величиной даваемого ими смещения. Долгое время данное уравнение практически не использовалось, так как не было достаточно четких экспериментальных данных, способствующих успешному развитию идеи. Первые же дислокационные теории механических свойств были по существу статическими теориями. Они сыграли большую роль в понимании возможных механизмов торможения дислокаций, но существенное продвижение в этой области произошло лишь после того, как экспериментально удалось измерить скорости движения отдельных дислокаций.

Таким образом, при динамическом подходе для определения величины критического напряжения при заданных значениях скорости деформации и температуры необходимо знать плотность подвижных дислокаций и зависимость скорости движения дислокаций от напряжений и температуры. Согласно современным представлениям, динамические свойства дислокаций определяются целым рядом факторов, а именно: силами Пайерлса-Набарро (взаимодействием дислокаций с кристаллической решеткой), торможением дислокаций за счет точечных дефектов, взаимодействием друг с другом, а также динамическими и релятивистскими потерями. В последние годы изучению этих факторов было уделено большое внимание, и в настоящее время уже имеется значительное количество экспериментальных данных по определению динамических законов, описывающих поведение отдельных дислокаций в различных условиях. Знание экспериментальных зависимостей для отдельных дислокаций позволило глубже понять влияние на сопротивление деформированию кристаллов ряда факторов, например, таких как скорость деформации, температура, наличие точечных дефектов и др. Гораздо хуже обстоит дело при попытке не только определить критические сдвиговые напряжения, но и полностью описать кривую упрочнения. Известно, что в процессе пластической деформации происходит существенное изменение дефектной структуры кристаллов — появляются новые дислокации и их новые конфигурации, на дислокациях возникают ступеньки и рождаются точечные дефекты. В результате поведение дислокаций в деформированных кристаллах может определяться рядом дополнительных взаимодействий, а именно взаимодействием с другими дислокациями, имеющими такой же вектор Бюргерса и движущимися в параллельных плоскостях, с разного рода дефектами, остающимися после прохождения других дислокаций, и, наконец, с дислокациями, имеющими другой вектор Бюргерса и движущимися в другой системе плоскостей. В этом случае практически невозможно непосредственно изучить динамику



движения отдельной дислокации, поскольку при большой плотности дислокаций экспериментально очень трудно выделить ту из них, за которой следует вести наблюдение [4].

Кроме того, как уже упоминалось, для использования динамического подхода необходимо знать плотность подвижных дислокаций в каждый момент времени. К сожалению, непосредственное определение этой величины также представляет большие трудности, так как почти все имеющиеся методы наблюдения дислокаций являются статическими.

Наконец, для нахождения полной кривой упрочнения кроме сведений о виде зависимости скорости деформирования от общей плотности дислокаций необходимо знать еще, каким образом дислокационная структура эволюционирует во времени. Для этого, прежде всего, должны быть известны такие важные параметры, как коэффициенты размножения дислокаций и других дефектов, влияющих на движение дислокаций, а также длины пробега дислокаций, определяющие общую деформацию образца.

С точки зрения теории пластичности и прочности, всестороннее исследование факторов, влияющих на указанные параметры в кристаллах, в широком диапазоне скоростей, напряжений и температур испытания представляется весьма важной и необходимой задачей. В то же время экспериментальных работ, подробно исследующих развитие дислокационной структуры кристаллов с этих позиций, пока очень мало, и поэтому при построении теории упрочнения подчас приходится принимать за основу не совсем физически ясные экспериментальные данные, произвольно выбирая их из мозаики имеющихся противоречивых фактов.

Основная часть. Настоящая работа посвящена уточнению аналитического расчета напряженно-деформированного состояния слоя композитного покрытия, учитывающего характер размножения и движения дислокаций, с целью более точного прогнозирования эксплуатационных свойств покрытия, обеспечивающего увеличение долговечности и снижение себестоимости восстановленных деталей и узлов.

Наиболее поразительное свойство кристаллов – их пластичность, т. е. способность легко деформироваться, если исходить из того, что даже хорошо отожденные кристаллы содержат дислокации, которые могут двигаться по кристаллу и благодаря этому вызывать заметную пластическую деформацию. Эти дислокации, образующие так называемую исходную дислокационную структуру, составляют, согласно [5] пространственную сетку, ячейки которой состоят из почти прямолинейных дислокационных сегментов, соединенных между собой тройными узлами. Средняя длина дислокационных сегментов между узлами сетки равна l_0 . Она зависит от условий роста и обработки кристалла. Решающим для движения дислокаций параметром является среднее расстояние l_w между дислокациями (так называемая ширина петли). Соотношения между этими параметрами детально рассмотрены в [5, 6]. Под действием приложенного сдвигового напряжения дислокации могут выходить на поверхность кристалла, после чего они уже не участвуют в дальнейшей пластической деформации. Поэтому для поддержания процесса деформирования внутри кристалла должны непрерывно рождаться новые дислокации. Действие дислокационного источника можно представлять следующим образом. В отсутствие внешнего напряжения дислокационный сегмент длиной l_0 , лежащий между узлами дислокационной сетки, представляет собой отрезок прямой линии, так как в этом случае его энергия минимальна. Под действием внешнего сдвигового напряжения τ дислокационный сегмент начинает выгибаться. При этом радиус кривизны линии дислокации определяется соотношением:

$$\rho = \frac{E_L}{b\tau}, \quad (1)$$

где E_L – линейное натяжение дислокации.

Приближенно:

$$E_L = \frac{Gb^2}{2}. \quad (2)$$



Поэтому:

$$\rho = \frac{Gb}{2\tau}. \quad (3)$$

Состояние равновесия дислокационной дуги становится неустойчивым, когда ее радиус кривизны уменьшится до значения $\rho = l_0/2$. Тогда спонтанно образуется замкнутая дислокационная петля (рисунок 1).

Это означает, что источник непрерывно испускает дислокационные петли, как только внешнее сдвиговое напряжение достигнет значения, равного напряжению его активации, определяемому соотношением:

$$\tau_{FR} = \frac{Gb}{l_0}. \quad (4)$$

В какой мере критическое сдвиговое напряжение τ_0 определяется напряжением активации τ_{FR} , зависит от среднего расстояния l_w между дислокациями. Предположение о том, что в пластически деформируемых металлах дислокации производятся источниками, позволяет дать простое объяснение экспериментальному факту, состоящему в том, что существует дискретный набор действующих плоскостей скольжения и соответствующих им следов скольжения. В [5, 7] указывается на то, что если точки закрепления источника лежат в разных плоскостях скольжения, то при работе такого источника образуются малые дислокационные петли, так называемые диполи.

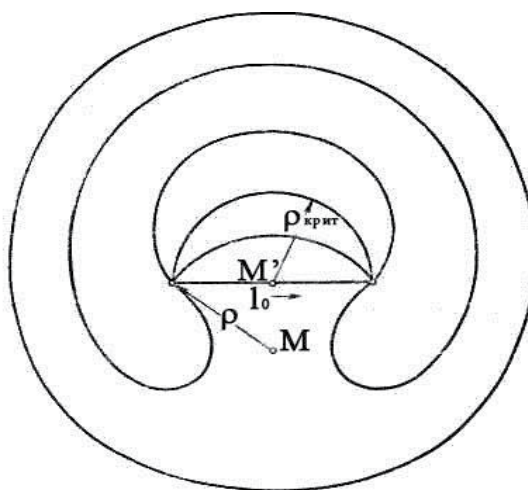


Рисунок 1 – Схема работы источника дислокаций

Согласно [1, 2], дислокационная структура, образованная параллельными дислокациями, создает поле напряжений, максимумы которого располагаются на расстояниях порядка расстояния R'_0 между дислокациями. С ростом R'_0 величина максимума напряжений убывает пропорционально $1/R'_0$.

Чтобы краевая дислокация прошла между двумя одноименными дислокациями, находящимися на расстоянии R'_0 друг от друга (рисунок 2), необходимо приложить напряжение:

$$\tau = \tau_G^{(i)} = \frac{G}{2\pi(1-\nu)} \times \frac{b}{R'_0}. \quad (5)$$

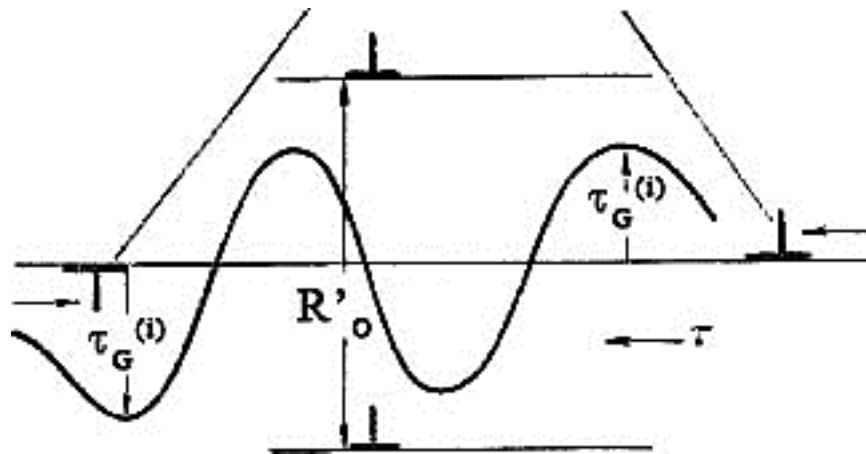


Рисунок 2 – К рассмотрению взаимодействия параллельных дислокаций

В случае винтовых дислокаций это напряжение равно:

$$\tau = \tau_G^{(i)} = \frac{G}{2\pi} \times \frac{b}{R'_0}. \quad (6)$$

Необходимо учитывать, что любая дислокация притягивается или отталкивается другими дислокациями, пересекающими ее плоскость скольжения [1–3]. При количественной оценке рекомбинации результаты можно суммировать следующим образом. Чтобы движущаяся дислокация преодолела барьер, создаваемый притягивающей дислокацией, необходимо большее напряжение, чем для преодоления барьера, создаваемого отталкивающей дислокацией. Если l_w – среднее расстояние между разноименными дислокациями, то необходимое сдвиговое напряжение равно:

$$\tau_G^{(w)} = \frac{bG}{5l_w}. \quad (7)$$

Верхний индекс w введен для того, чтобы отличить вклад в критическое сдвиговое напряжение, вносимый дислокациями, от вклада $\tau_G^{(i)}$, вносимого параллельными дислокациями. Отметим, что как $\tau_G^{(i)}$, так и $\tau_G^{(w)}$ пропорциональны модулю сдвига G , поэтому их нельзя отделить друг от друга путем измерения температурной зависимости критического сдвигового напряжения. В энергетическом отношении дислокациям выгодно располагаться параллельно друг другу на некотором участке длиной l_R , так как дальнедействующие поля напряжений при этом уменьшаются. Дислокации в промежуточной конфигурации не способны перемещаться путем скольжения. Однако, в результате поперечного скольжения может быть создана новая конфигурация. В этой конфигурации обе дислокации, на которых в результате поперечного скольжения образовалось по одной ступеньке, способны скользить, и только вновь образованный диполь, лежащий между обеими дислокациями, представляет собой малоподвижное образование.

В критическое сдвиговое напряжение вносят вклад короткодействующие силы, проявляющиеся в процессах пересечения. В противоположность упругому взаимодействию, описываемому известными соотношениями, процессы пересечения совершаются в областях с размерами порядка атомных, поэтому часть энергии, которая требуется для пересечения, может



поставить тепловые колебания. Это означает, что по мере повышения температуры процессы пересечения протекают легче и процесс деформирования все в большей степени определяется дальнедействующими полями напряжений. Силы, которые нужно преодолеть в процессе пересечения, вызываются следующими причинами:

- образованием ступенек при пересечении дислокаций;
- образованием вакансий и межузельных атомов подвижными ступеньками на дислокациях с преимущественно винтовой ориентацией;
- образованием перетяжек на расщепленных дислокациях.

Эти три процесса находятся в тесной взаимосвязи друг с другом, чем и обусловлены трудности анализа критического сдвигового напряжения.

Выводы. Определены силы, которые нужно преодолеть в процессе пересечения.

Разработаны аналитические выражения, позволяющие определять напряженно-деформированное состояние гальванического композитного покрытия и, как следствие, прогнозировать его физико-механические и эксплуатационные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жачкин С.Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей. Воронеж: ВГТУ, 2002. 138 с.
2. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 2007. 400 с.
3. Новые материалы / под ред. Ю.С. Карабасова. М.: «МИСИС», 2002. 736 с.
4. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Краснова М.Н. Износостойкость композитных гальванических хромовых покрытий // Engineering Studies, 2017. № 3 (2). Т. 9. С. 529–535.
5. Новиков И.И. Дефекты кристаллического строения металлов. М: Metallurgia. 2005. 208 с.
6. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Краснова М.Н., Сидоркин О.А. Восстановление гидроцилиндров дисперсно-упрочненным гальваническим композитным покрытием на основе хрома. Воронеж: ВГТУ, 2017. 162 с.
7. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие. Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, 2009. 64 с.

REFERENCES

1. Zhachkin S.Yu. Holodnoe gal'vanokontaktное vosstanovlenie detalej. Voronezh: VGTU, 2002. 138 p.
2. Shermergor T.D. Teoriya uprugosti mikroneodnorodnyh sred. M.: Nauka, 2007. 400 p.
3. Novye materialy / pod red. Yu.S. Karabasova. M.: «MISIS», 2002. 736 p.
4. Zhachkin S.Yu., Pen'kov N.A., Krasnova M.N. Iznosostojkost' kompozitnyh gal'vanicheskikh hromovyh pokrytij // Engineering Studies, 2017. № 3 (2). Т. 9. pp. 529–535.
5. Novikov I.I. Defekty kristallicheskogo stroeniya metallov. M: Metallurgiya. 2005. 208 p.
6. Zhachkin S.Yu., Pen'kov N.A., Krasnova M.N., Sidorkin O.A. Vosstanovlenie gidrocilindrov dispersno-uprochnennym gal'vanicheskim kompozitnym pokrytiem na osnove hroma. Voronezh: VGTU, 2017. 162 p.
7. Stepanova T.Yu. Tehnologii poverhnostnogo uprochneniya detalej mashin: uchebnoe posobie. Ivan. gos. him.-tehnol. un-t. Ivanovo, 2009. 64 p.

© Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Краснова М.Н., Яценко С.Н., 2020

Жачкин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, zhach@list.ru.



Пеньков Никита Алексеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского центра (образовательных и информационных технологий), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, myth_np_nikit@mail.ru.

Краснова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, krasnovam27@mail.ru.

Яценко Светлана Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, svetnik.vrn@gmail.com.