МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.В. ПАРАХИНА»

КАФЕДРА «НАДЕЖНОСТЬ И РЕМОНТ МАШИН»

УДК 621.793.71
Инв. № 68.85.83

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета агротехники
и энергообеспечения
ФГБОУ ВО Орловский ГАУ
_____С.И. Головин
_____2023 г.

ОТЧЕТ

о выполнении научно-исследовательской работы в 2023 году

«Разработка и совершенствование технологий изготовления, восстановления и упрочнения деталей при производстве и ремонте сельскохозяйственной техники»

СОГЛАСОВАНО
Протокол заседания кафедры
надежности и ремонта машин
от____ _____20___г. №____

Заведующий кафедрой
к.т.н., доцент _____Н.В. Титов
подпись, дата

Орел, 2023 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

№ п/п	Ф.И.О.	Занимаемая должность	Ученая степень	Ученое звание	Подпись
1.	Титов Н.В.	Зав. кафедрой	к.т.н.	доцент	
2.	Кузнецов Ю.А.	профессор	д.т.н.	профессор	
4.	Кузнецов И.С.	доцент	к.т.н.	доцент	
5.	Логачев В.Н.	доцент	к.т.н.	доцент	
6.	Гончаренко В.В.	доцент	к.т.н.	доцент	
7.	Чернышов Н.С.	доцент	к.т.н.	доцент	
8.	Зайцев С.А.	доцент	к.т.н.	доцент	
9.	Коренев В.Н.	доцент	к.т.н.	доцент	
10.	Семешин А.Л.	доцент	к.т.н.	доцент	

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 94 с., 8 ч., 42 рис., 8 табл., 91 источник.

МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ, ШЕСТЕРЕННЫЙ НАСОС НШ-32У-2, КОРПУС НАСОСА, ВТУЛКА НАСОСА, ВОССТАНОВЛЕНИЕ, УПРОЧНЕНИЕ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ, РЕСУРС.

Объектом исследования является технология восстановления пластическим деформированием с упрочнением МДО корпуса и втулки шестеренного насоса НШ-32У-2.

Предметом исследования являются зависимости режимов микродугового оксидирования и состава электролита на физико-механические свойства покрытий сформированных на пластически деформированных сплавах АК-7ч и АО3-7.

Цель работы заключается в повышении износостойкости деталей из алюминиевых сплавов, восстановленных пластическим деформированием, и разработать технологию упрочнения МДО восстановленных пластическим деформированием деталей из алюминиевых сплавов (на примере корпуса и втулки шестеренного насоса НШ-32У-2).

В ходе проведения научных исследований была выполнена следующая работа:

1. Исследована микроструктура литейного алюминиевого сплава АК7ч до и после пластической деформации и установлена ее влияние на расположение покрытия, сформированного МДО, относительно действительного размера детали.

2. Установлено влияние компонентов электролита типа «КОН-Na_2SiO_3» и режимов МДО на толщину, скорость формирования и микротвердость покрытий, сформированных на пластически деформированных литейном и антифрикционном алюминиевых сплавах. Определена работоспособность электролита.

3. Определены внутренние напряжения, возникающие в детали после пластического деформирования, после ее упрочнения МДО, а также в самом покрытии и установлено их влияние на износостойкость покрытия.

4. Исследована износостойкость покрытий.

5. Проведены сравнительные стендовые и эксплуатационные испытания новых и восстановленных по предлагаемой технологии насосов НШ-32У-2.

6. Разработан технологический процесс упрочнения МДО восстановленных пластическим деформированием деталей из алюминиевых сплавов (на примере корпуса и втулки насоса НШ-32У-2).

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ……..5
ОПРЕДЕЛЕНИЯ,ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.……...6
ВВЕДЕНИЕ……7
1 Обоснование влияния микроструктуры сплава АК7ч после пластического деформирования на толщину покрытия, сформированного МДО……..….9
1.1 Пластическое деформирование и изменения в микроструктуре материала корпуса……9
1.2 Энергия активации растворения пластически деформированного металла…….....12
2 Влияние состава электролита и режимов МДО на толщину и скорость формирования покрытий…….....15
3Микротвердость покрытий……25
4 Работоспособность электролита…….28
5 Внутренние напряжения……..29
6 Сравнительные испытания на изнашивание……..32
7 Сравнительные стендовые и эксплуатационные испытания…….45
7.1 Сравнительные стендовые испытания шестеренных насосов НШ-32У-2……..45
7.2 Сравнительные эксплуатационные испытания шестеренных насосов НШ-32У-2…….…..47
8 Технологический процесс упрочнения МДО восстановленных пластическим деформированием деталей из алюминиевых сплавов шестеренного насоса НШ-32У-2…….....48
8.1 Технологический процесс восстановления пластическим деформированием с упрочнением МДО корпуса шестеренного насоса НШ-32У-2…….48
8.2 Технологический процесс восстановления пластическим деформированием с упрочнением МДО втулки шестеренного насоса НШ-32У-2……..54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ……58
ЛИТЕРАТУРА……..59
ПРИЛОЖЕНИЯ……66

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем отчете использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 2.105-95 - Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам.

ГОСТ 2.111-88 - Единая система конструкторской документации. Нормоконтроль.

ГОСТ 2789-83 - Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения.

ГОСТ 1583-93 - Сплавы алюминиевые литейные.

ГОСТ 9450-96 - Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

ГОСТ 27.410-87 - Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

ГОСТ 8.417-2002 - Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.

ГОСТ 7.12-93 - Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов русском языке. Общие требования и правила

ГОСТ 7.1-2003 - Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете использованы ссылки на следующие термины с соответствующими определениями:

Микродуговое оксидирование – способ заключается в том, что на алюминиевую деталь, расположенную в электрохимической ванне через специальный источник питания подается ток, приводящий к образованию на поверхности детали микроплазменных разрядов, под воздействием которых поверхностный слой детали перерабатывается в оксиды алюминия. На поверхности детали образуется прочный оксидно-керамический слой толщиной до 300 мкм.

Пластическое деформирование – это изменения формы и размеров тела под действием внешних сил, которые остаются после снятие нагрузки.

Микроструктура – строение, невидимое невооруженным глазом (в металлах – в виде мелких кристалликов-зёрен; в полимерах – в виде надмолекулярных физических образований, как способа совместной упаковки индивидуальных макромолекул).

В настоящем отчете о НИР применяют следующие обозначения и сокращения:

МДО – микродуговое оксидирование;

МДР – микродуговые разряды.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Большинство машин и агрегатов (85…90%) утрачивают работоспособность не из-за поломок, а вследствие изнашивания рабочих поверхностей деталей. Поэтому повышение износостойкости деталей машин является одной из важных и актуальных проблем предприятий, занимающихся как изготовлением, так и ремонтом техники. Постоянное увеличение стоимости запасных частей и их невысокое качество также стимулируют разработку технологий изготовления и восстановления, позволяющих снизить износ деталей, узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники при ее эксплуатации.

В ремонтном производстве для восстановления деталей широко применяется пластическое деформирование, в том числе и для деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов. Перспективным способом упрочнения, получающим в последнее время всё более широкое распространение, является микродуговое оксидирование (МДО), которое в последнее время относят к нано-технологиям. Большой вклад в развитие МДО внесли Марков Г.А., Фёдоров В.А., Черненко В.И., Малышев В.Н., Эпельфельд А.В., Батищев А.Н., Новиков А.Н., Кузнецов Ю.А., Суминов И.В., Гордиенко П.С., Снежко Л.А. и ряд других учёных. К основным преимуществам МДО относят: получение многофункциональных покрытий заданного состава, структуры и толщины, возможность нанесения покрытий одинаковых по составу, свойствам и толщине, как на внешние, так и на внутренние поверхности, доступность химических реактивов, экологичность процесса и отсутствие специальных очистных сооружений при использовании силикатно-щелочных электролитов. Изучение физико-механических свойств покрытий, полученных на деталях из алюминиевых сплавов, восстановленных пластическим деформированием, позволит значительно увеличить их износостойкость, а, следовательно, долговечность и является перспективным направлением развития ремонтного производства в современных условиях.

Цель работы. Повысить износостойкость деталей из алюминиевых сплавов, восстановленных пластическим деформированием, и разработать технологию упрочнения МДО восстановленных пластическим деформированием деталей из алюминиевых сплавов (на примере корпуса и втулки шестеренного насоса НШ-32У-2).

Научная новизна:

1. Обосновано и экспериментально подтверждено, что микроструктура сплава после пластического деформирования и термической обработки влияет на расположение упрочненного слоя относительно действительного размера детали.

2. Установлены рациональные состав электролита и режимы МДО для упрочнения деталей из алюминиевых сплавов, восстановленных пластическим деформированием, позволяющие в 2,5…3 раза увеличить износостойкость соединений.

Практическая ценность работы заключается в разработке технологии упрочнения МДО восстановленных пластическим деформированием деталей из алюминиевых сплавов. Технология апробирована на примере корпуса и втулки шестеренного насоса НШ-32У-2.

Реализация результатов исследований. Разработанная технология упрочнения МДО восстановленных пластическим деформированием корпуса и втулки шестеренного насоса НШ-32У-2принята к внедрению в учебном процессе ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.

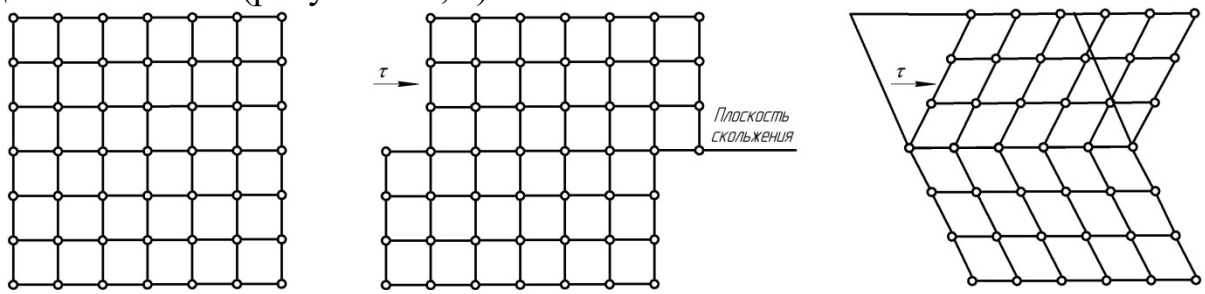
Достоверность и обоснованность результатов подтверждается использованием стандартных, общепринятых методов исследований, современных контрольно-измерительных приборов, оборудования и инструмента, применением математической обработки информации с использованием ПЭВМ, хорошей сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, стендовыми и эксплуатационными испытаниями.

1 Обоснование влияния микроструктуры сплава АК7ч после пластического деформирования на толщину покрытия, сформированного МДО

1.1 Пластическое деформирование и изменения в микроструктуре материала корпуса

Пластическое деформирование корпуса осуществляют в специальной лепестковой пресс-форме на гидравлическом 100-тонном прессе. Для этого корпус нагревают в электропечи до температуры 480...500°С и выдерживают в течение 30...40 мин. После чего его устанавливают в блок матриц и обжимают. Обжатие заканчивают при температуре не ниже 440°С, иначе резко снижается пластичность сплава. После обжатия деталь подвергают термической обработке. Корпус помещают в печь и выдерживают 15…30 мин при температуре 520...535°С, а затем закаливают в воде, нагретой до температуры 50...80°С. Закаленный корпус подвергают отпуску в течение 1,5 ч при температуре 240...250°С.

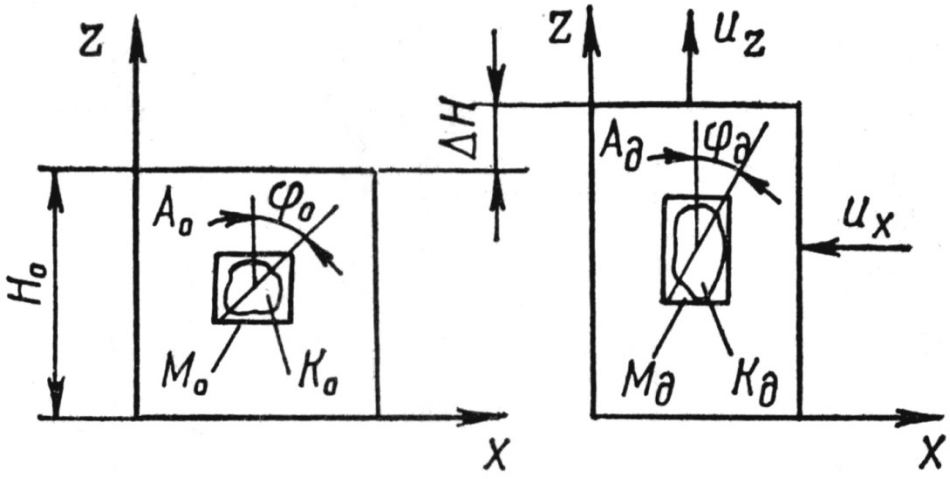
Материал корпуса – алюминиевый сплав АК7ч с плотностью 2,7 г/см^3 и температурой плавления 660ºС. Имеет гранецентрированную кубическую решетку. Обладает высокой тепло- и электропроводностью. Химически активен, но образующаяся плотная пленка оксида алюминия Al_2O_3, предохраняет его от коррозии. При пластической деформации корпуса зерна металла вытягиваются в направлении деформации, и кристаллические решетки искажаются [5]. Идет скольжение одних слоев атомов кристалла по другим, причем они перемещаются на дискретную величину, равную целому числу межатомных расстояний (рисунок 1.1 а, б). В промежутках между полосами скольжения деформация не происходит. Твердое тело не изменяет своего кристаллического строения во время пластической деформации и расположение атомов в элементарных ячейках сохраняется. Плоскостями скольжения являются кристаллографические плоскости с наиболее плотной упаковкой атомов. При пластической деформации присутствует двойникование – поворот одной части кристалла в положение симметричное другой его части [62]. Плоскостью симметрии является плоскость двойникования (рисунок 1.1, в).



а) б) в)

Рисунок 1.1 – Схемы пластической деформации материала под действием касательных напряжений (τ): а – исходное состояние; б – скольжением; в – двойникованием

При деформации изменяется не только форма отдельных кристаллитов (зерен), но и их положение в пространстве. Попытаемся описать изменение структуры поликристаллического тела на основе модельных представлений. Рассмотрим участок стенки корпуса насоса как поликристаллическое тело A_0 в виде куба и выделим в нем элемент M_0, геометрически подобный рассматриваемому телу (рисунок 1.2). При пластической деформации тела получаем заданное относительное удлинение вдоль оси Z. Элемент M_0 также получит удлинение и останется геометрически подобным деформированному телу A_∂. Макроскопическая деформация тела в целом – это результат микроскопической деформации кристаллитов, образующих его. Если в исходном состоянии кристаллиты имеют форму, близкую к равноосной, то элемент M_0 можно выделить так, чтобы он был описан вокруг некоторого кристаллита K_0 (рисунок 1.2, а). Пусть плоскости скольжения в этом кристаллите образуют с осью Z угол φ_0. При деформации кристаллитаK сдвигом он приобретает форму K_∂ (рисунок 1.2, б). Но в процессе деформации элемент M_0 преобразуется в элемент M_∂, а кристаллит K_∂ не выходит за пределы элемента M_∂. Это значит, что при деформации кристаллит поворачивается, а угол между плоскостями скольжения и осью Z уменьшается до φ_∂. Легко убедиться, что первоначальная ориентировка плоскостей скольжения, определяемая углом φ_0, не изменяет общей картины: угол φ_∂ всегда оказывается меньшим, чем φ_0. Следовательно, при пластической деформации кристаллиты приобретают удлиненную форму, вытягиваясь вдоль направления главной деформации, а плоскости скольжения, поворачиваясь в пространстве, получают преимущественную ориентировку в направлении главной деформации [62, 63].

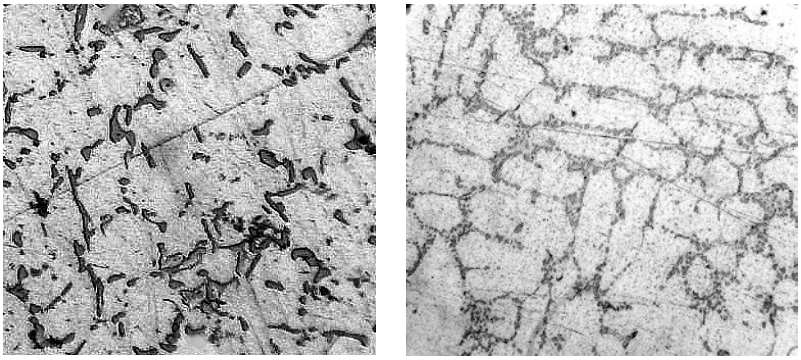


а) б)

Рисунок 1.2 – Исходное (а) и деформированное (б) состояние кристаллита K в поликристаллическом теле A

Деформация поликристаллического тела складывается из деформации отдельных зерен и деформации в приграничных объемах. Отдельные зерна

деформируются скольжением и двойникованием, однако взаимная связь зерен и их множественность в поликристалле вносят свои особенности в механизм деформации. Плоскости скольжения зерен произвольно ориентированны в пространстве, поэтому под влиянием внешних сил напряжения в плоскостях скольжения отдельных зерен будут различны. Деформация начинается в отдельных зернах, в плоскостях скольжения которых возникают максимальные касательные напряжения. Соседние зерна будут разворачиваться и постепенно вовлекаться в процесс деформации. Деформация приводит к изменению формы зерен: зерна получают форму, вытянутую в направлении наиболее интенсивного течения металла (поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль направления деформации). Изменение микроструктуры после пластического деформирования алюминиевого сплава АК7ч показано на рисунке 1.3. Металл приобретает волокнистое строение. Волокна с вытянутыми вдоль них неметаллическими включениями являются причиной неоднородности свойств вдоль и поперек волокон. Одновременно с изменением формы зерен при пластической деформации происходит изменение ориентировки в пространстве их кристаллической решетки.



а) б)

Рисунок 1.3 – Микроструктура сплава АК7ч 200$^{\times}$: а – исходное состояние; б – после пластического деформирования и термической обработки

Большую роль на упрочнение материала оказывают структурные дефекты кристаллов (дислокации). Дислокации возникают при пластической деформации, термической обработке, кристаллизации или охлаждении кристаллов после исчезновения жидкой фазы.

В теории дислокации рассматриваются множественные механизмы возникновения дислокаций. Все они сводятся к возникновению локальных участков концентрации напряжений на границе твердых и жидких фаз. Эта концентрация возникает в результате термических градиентов, изменения состава и структуры кристалла, наличие примесей, вакансий, различных случайностей рода кристаллов, размножение зародившихся на первых этапах кристаллизации дислокаций и др.

В поликристаллических телах (металлах) кристаллы отличаются пространственной ориентацией. Внутри зерен существуют субзерна, в которых имеются блоки, разориентированные относительно друг от друга на угол менее 10°. Границы зерен и блоков являются источниками зарождения дислокаций.

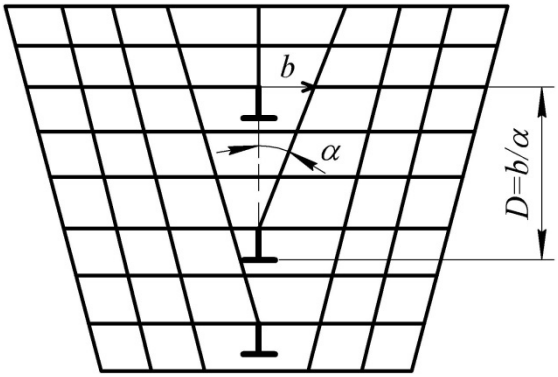


Рисунок 1.4 – Схема малоугловой границы

На рисунке 1.4 показана малоугловая граница блоков. Решетки блоков упруго сопрягаются во всех областях, кроме тех, в которых находятся дислокации. Расстояние между дислокациями в границе D определяется как вектор Бюргерса b деленный на угол разориентирования зерен α.

Возникновение дислокаций приводит к нарушению чередования слоев кристаллической решетки. Дислокации, возникшие при кристаллизации, имеют свойства размножаться или исчезать при пластической деформации, термообработки или других видах энергетического воздействия.

При пластической деформации алюминиевого сплава АК7ч прочностные характеристики материала (предел упругости, предел текучести, предел прочности) и твердость увеличиваются [64, 65]. Из рисунка 1.3 видно, что после пластической деформации и последующей термической обработки структура сплава АК7ч заметно улучшается. Размер зерна деформированного сплава значительно меньше, чем у материала в исходном состоянии и наблюдается более равномерное распределение по границам зерен крупнокристаллических включений, что подтверждается и исследованиями ряда авторов.

1.2 Энергия активации растворения пластически деформированного металла

Теория процесса растворения металла разрабатывалась на основе представлений об атомном механизме образования и роста кристаллов из газовой фазы, развитых Косселем, Странским, а также Бартоном, Кабрерой и Франком и перенесенных Лоренцем на электрохимические процессы [63, 65, 66]. По теории Косселя и Странского атомы или ионы на поверхности кристалла могут находится в трех различных положениях (рисунок 1.5). Состояние *г* соответствует нахождению атома (иона) вне твердой фазы. В

положении *в* находится атом (ион) на плоскости решетки в виде ад-атома (ад-иона) (по Лоренцу ад-атом – металлический атом в самом последнем или, наоборот, самом первом состоянии связи с решеткой), в положении *б* – на кристаллической ступени и в состояниях *а, д* – в полукристаллическом положении, которое называют также местом роста кристалла. Растворение металла может осуществляться одновременно по трем параллельным путям. Путь *1* проходит через все промежуточные состояния *а→б→в→г*, путь *2* – через *а→б→г* и пути *3, 4* непосредственно через *а→г* и *д→г.* Значения энергии связи различных состояний атомов с кристаллической решеткой в ходе растворения металла показаны на рисунке 1.6. Так как связи атомов в состояниях *д, а, б, в* в этой последовательности становятся менее прочными, то энергия растворения $Eв < Eб < Eа < Eд$. Последней стадией является реакция перехода, энергетический максимум которой представляет собой энергию активации перехода иона металла через фазовую границу. Как видно из рисунка 5.6 энергия активации ионизации повышается при переходе в электролит более прочно связанного с решеткой атома металла. Поэтому несмотря на то что поверхностных позиций, которые имеются для анодной реакции перехода *1* (*в→г*), меньше, чем для реакции *2* (*б→г*), и еще меньше, чем для реакции *3* (*а→г*), принято считать, что доминирующим является путь реакции *1*.

При рассмотрении процесса растворения поликристаллического металла следует учитывать, что с раствором электролита вследствие произвольной ориентации зерен одновременно контактируют разные грани кристаллической решетки металла. Поскольку энергии связи поверхностных атомов, принадлежащих этим граням, различны, то в отличие от классических представлений уровни энергий *а, б, в, д,* изображенные на рисунке 5.6, следует рассматривать как некоторые средние значения энергий связи поверхностных атомов с кристаллической решеткой металла [62, 63].

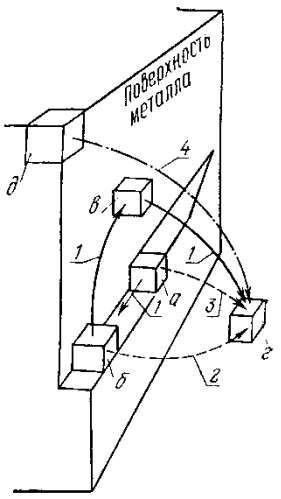


Рисунок 1.5 – Схематическое изображение процесса растворения металла по теории Косселя и Странского: 1, 2, 3, 4 – путь реакции расствореня; *а, б, в, г, д* – уровень энергии расствореня

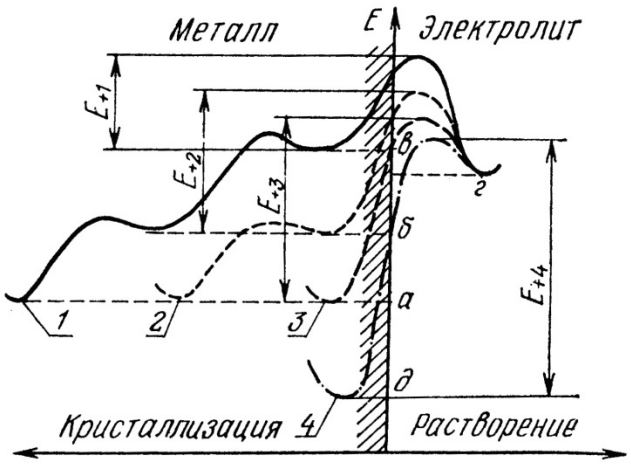


Рисунок 1.6 – Изменение энергии активации ионизации атомов металла E_+ в зависимости от пути реакции: 1, 2, 3, 4 – путь реакции расствoрения; *а, б, в, г, д* – уровень энергии расствoрения

Пластическое деформирование с точки зрения классических представлений о растворении металла повышает концентрацию поверхностных атомов, находящихся в состояниях *в* и *б*, и должно приводить, таким образом, к снижению энергии растворения металла за счет преимущественной реализации путей реакции *1* и *2*, энергия активации которых меньше, чем при реализации реакции по путям *3* и *4*.Вместе с тем, поскольку пластическое деформирование вызывает искажение кристаллической решетки и возникновение в ней внутренних напряжений, что снижает энергию связи поверхностных атомов, то изменяются и значения средних уровней энергии *Еа, Еб, Ев* и *Ед* соответствующих состояний поверхностных атомов, т. е. для деформированного металла эти значения будут более высокими, чем для не деформированного, а энергия активации E_{+1}, E_{+2}, E_{+3} и E_{+4} всех возможных путей ионизации атомов, соответственно, уменьшится (рисунок 1.6) [63]. В связи с этим можно утверждать, что энергия активации растворения деформированного металла должна быть ниже, чем обычного, вследствие снижения энергии активации всех возможных путей реакции ионизации атомов. Кроме этого, из работы [36] известно, что чем больше толщина покрытия, тем выше его микротвердость и износостойкость. Поэтому для обеспечения максимальной толщины и микротвердости покрытия, сформированного МДО, необходимо будет увеличивать содержание КОН в электролите для более интенсивного расстравливания металлической основы. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что при МДО пластически деформированного и термически обработанного литейного алюминиевого сплава покрытие будет располагаться, главным образом, с наружной стороны относительно действительного размера детали, по сравнению с покрытием сформированным аналогичным образом на сплаве исходного состояния.