У 2041180

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

Инж. ИОНЫЧЕВ Г. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА И УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК ПРУЖИННЫХ СПЛАВОВ НА ИХ СВОЙСТВА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

(Специальность 320— Металловедение и термическая обработка металлов)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1969

Работа выполнена на кафедре АМ-9 МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научные руководители: заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, доктор технических наук Прокошкин Д. А., профессор, доктор технических наук Рахштадт А. Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Хенкин М. Л., кандидат технических наук Шульга Ю. Н.

Ведущее предприятие — Государственный научно-исследовательский и проектный институт по обработке цветных ме-

У 2041180
Возвратите книгу не позже
обозначенного здесь срока

1969 г.

1969 г.

им. Бау-

ке МВТУ

нов

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
50,00 р.
2041180
Ионычев Г.С. Исследование влияния состава

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТС

Введение

Рост технического прогресса, развитие механизации и автоматизации производственных процессов неразрывно связаны с решением задачи повышения надежности работы приборов и устройств автоматического управления и регулирования.

Многие приборы автоматического управления и регулирования имеют большое количество различных упругих элементов (мембраны, пружины реле, переключателей, искателей, кнопок и т. п.), свойства которых, как правило, определяют точность и срок службы всего прибора или автоматического устройства.

Упругие элементы изготовляют, в основном, из тонколистовых пружинных сплавов, которые, наряду с высокими технологическими свойствами, должны обладать высоким комплексом механических свойств и их стабильностью во времени как при статическом, так и циклическом нагружении.

Основными характеристиками пружинных сплавов, определяющими стабильность и долговечность работы упругих элементов, являются: предел упругости, релаксационная стойкость и циклическая прочность. Однако, во многих случаях, одной из важнейших характеристик, определяющей стабильность работы упругого элемента в условиях одностороннего циклического нагружения, как показано в настоящей работе, является циклическая релаксация, характеризуемая величиной остаточной деформации, накапливаемой при этом циклическом нагружении. Увеличение этой деформации приводит к уменьшению действующего напряжения (или передаваемого усилия) в упругом элементе, что в свою очередь, задолго до усталостного разрушения, может изменить рабочие характеристики этих деталей и привести к преждевременному выходу из строя всего прибора или автоматического устройства в целом.

Однако, поведение пружинных сплавов, особенно в виде тонких лент, при циклическом нагружении не изучалось, поскольку определение циклической прочности и циклической релаксации этих сплавов имело ряд трудностей. Главнейшие

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
Библиотека

из них заключались в отсутствии методики испытаний тонколистовых пружинных сплавов и соответствующих испытательных установок на усталость и циклическую релаксацию. Поэтому в настоящее время в литературе и нет данных о влиянии состава сплавов, термической обработки и различных технологических факторов на указанные свойства пружинных сплавов. Кроме того, нет сведений о влиянии циклического нагружения на свойства пружинных сплавов (модуль нормальной упругости, предел упругости, электросопротивление и т. д.), характер изменения которых определяет пределы стабильности характеристик упругих элементов, работающих в условиях циклического приложения нагрузки.

В соответствии с изложенным целью данной диссертационной работы, поставленной по конкретным запросам промышленности — НИИ и КБ, было следующее:

1. Разработать конструкции и методики испытаний пружинных сплавов в виде тонких лент на усталость и циклическую релаксацию в интервале температур от —60 до +120° С.

2. Исследовать циклическую прочность и релаксацию при циклическом нагружении пружинных сплавов в виде прокатанных листов и лент в разных направлениях в плоскости листов в зависимости от методов их упрочнения и особенно термической обработки, состояния поверхности, нанесения гальванического покрытия и температуры.

3. Исследовать влияние циклического нагружения на структуру и свойства пружинных сплавов.

Материал и методика исследования

Для исследования были выбраны следующие наиболее широко распространенные в промышленности пружинные сплавы: оловянно-фосфористая бронза БрОФ6,5—0,15, нейзильбер МНЦ15-20, бериллиевые бронзы — БрБ2,5, БрБНТ1,9 и аустенитный сплав 36НХТЮМ8.

Исходным материалом для исследования указанных сплавов служила холоднокатанная лента, толщиной от 0,2 до 0,35 *мм*, из которой вырезались образцы для испытаний. Сплавы испытывались как в деформированном состоянии, так и после термической обработки по режимам, обеспечивающим высокое сопротивление малым пластическим деформациям как при статическом, так и циклическом нагружении, т. е. при оптимальных значениях свойств, определяющих качество пружинных сплавов. Исследование свойств БрОФ6,5-0,15 проводилось на холоднокатанных лентах, подвергнутых деформации при двух степенях обжатия — 50 и 80%, что соот-

ветствует твердому и особо твердому состоянию по ГОСТу, а также на лентах, деформированных и отожженных при 150, 250 и 300° С в течение 1 часа. Свойства нейзильбера МНЦ15-20 исследовались в особо твердом состоянии, а также после деформации и последующего низкотемпературного отжига при 300° С, 4 час.

Бериллиевые бронзы и сплав 36НХТЮМ8 подвергали закалке и отпуску по оптимальным режимам, применяемым в промышленности. Кроме того, бронзу БрБНТ1,9 и БрБ2 подвергали термомеханической обработке по схеме: закалка при температуре 780° С, холодная пластическая деформация прокаткой со степенью обжатия 30% и старение при 320° С, 2 час.

Для испытания пружинных сплавов на усталость и циклическую релаксацию были применены специально разработанные нами установки, поскольку существующие машины и установки, как показал проведенный в диссертации анализ, не пригодны для испытания тонколистовых пружинных образцов значительной длины и малой жесткости при условии их нагружения в условиях одностороннего чистого изгиба. Были созданы и изготовлены в металле установки, а также разработана соответствующая методика испытания на усталость и циклическую релаксацию тонколистовых пружинных сплавов в условиях одностороннего чистого изгиба как при нормальной, так повышенной (до +150° С) и низкой (до —60° С) температурах, которые нашли применение в промышленности.

Достоинством созданной установки для испытания на усталость и циклическую релаксацию пружинных сплавов при нормальной температуре является возможность одновременного испытания 50 образцов. Она состоит из пяти гибких передач с различными диаметрами шкивов, приводимых во вращение электродвигателем. На этих передачах закреплены исследуемые образцы. В установке для испытания пружинных сплавов при повышенной температуре, рассчитанной на одновременное нагружение 20 образцов, четыре гибкие передачи помещены в электропечь, а в установке для испытания сплавов при низкой температуре гибкая передача, на которой закреплены 5 образцов, помещена в холодильную камеру, охлаждаемую смесью ацетона с твердой углекислотой или другим хладагентом. Отсчет числа циклов нагружения и выключение установок при разрушении образцов осуществляется автоматически. Полученное хорошее соответствие значений циклической прочности тонколистовых образцов, испытанных на созданных установках по указанной выше методике, и изделий (сильфонов) свидетельствует о том, что по разработанной нами методике

испытания на усталость образцов простой формы можно судить о циклической прочности изделий.

Была разработана методика определения циклической релаксации пружинных сплавов по величине остаточной деформации, накапливаемой при циклическом нагружении тонколистовых образцов в условиях одностороннего чистого изгиба.

Для установления особенностей воздействия циклического нагружения на изменение величины остаточной деформации, возникающей в условиях циклического нагружения исследуемых сплавов также определялась величина остаточной деформации, накапливаемой при статическом приложении нагрузки (статическая релаксация) по методике, разработанной на кафедре АМ-9. Предел упругости сплавов как в исходном состоянии, так и после термической обработки и циклического нагружения, определяли по величине остаточного прогиба после нагружения образца по схеме продольного изгиба. Модуль нормальной упругости определяли динамическим (резонансным) методом. Остаточные напряжения в образцах в исходном состоянии, а также после статического и циклического нагружения, определяли методом последовательного удаления травлением поверхностных слоев, а их величину вычисляли по формуле Н. Н. Давиденкова и Е. М. Шевандина. Изменение тонкой структуры пружинных сплавов при циклическом нагружении исследовалось электронно-микроскопическим методом на просвет и рентгенографическим методом на установке УРС50И.

Кроме указанных методов исследования в работе были также использованы: метод измерения микротвердости, электросопротивления и микроскопическое исследование структуры сплава с помощью оптического микроскопа.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Влияние деформационного упрочнения на свойства пружинных сплавов при циклическом нагружении. Установлено, что повышение деформационного упрочнения (или степени холодной пластической деформации прокаткой) оловянно-фосфористой бронзы с 50 до 80% значительно (в 5—6 раз) снижает циклическую релаксацию, определенную по величине остаточной деформации, накапливаемой при циклическом нагружении. При этом было установлено, что при напряжениях изгиба и базы испытания, достаточных для усталостного разрушения, полученные графические зависимости изменения скорости роста остаточной деформации, накапливаемой при циклическом нагружении оловянно-фосфористой бронзы, мож-

но условно разделить на три стадии: ускоренный рост, период замедленного роста и период быстрого нарастания деформации, завершающийся усталостным разрушением. Полученная нами закономерность изменения величины остаточной деформации при циклическом нагружении БрОФ6,5—0,15 оказалась общей для всех исследованных в работе пружинных сплавов, различных по составу и способам упрочнения.

Установлено, что повышение степени обжатия с 50 до 80% БрОФ6,5—0,15 и возникающее при этом упрочнение не только значительно повышает релаксационную стойкость, но также увеличивает и циклическую прочность сплава как в области малоцикловой усталости, так и предел выносливости. Так, увеличение степени холодной пластической деформации от 50 до 80% повышает предел выносливости бронзы на базе $N=5\cdot10^6$ циклов примерно на 20%.

Показано, что термомеханическая обработка бериллиевой бронзы БрБНТ1,9 по технологической схеме: закалка, холодная пластическая деформация со степенью обжатия 30% и последующее старение значительно улучшает свойства бронзы при циклическом нагружении по сравнению с обычной двойной обработкой (закалка и старение). Так, величина остаточной деформации, характеризующей релаксационную стойкость при циклическом нагружении БрБНТ1,9, подвергнутой термомеханической обработке, составляет $0{,}4\cdot10^{-3}$% (условия испытаний: $\sigma_0=62$ *кГ/мм*^{2}, $N=5\cdot10^4$ циклов), а после обычной двойной термической обработки —$1{,}7\cdot10^{-3}$%, т. е. примерно в 4 раза больше. Число циклов до разрушения БрБНТ1,9, подвергнутой указанной выше термомеханической обработке, также выше, чем бронзы, обработанной по обычному режиму. Так, образцы, подвергнутые термомеханической обработке, разрушились при $\sigma_0=62$ *кГ/мм*^{2} за $1{,}8\cdot10^5$ циклов нагружения, а после обычной двойной обработки — за $1{,}5\cdot10^5$ циклов. Таким образом, термомеханическая обработка БрБНТ1,9 может быть рекомендована для улучшения характеристик упругих элементов, работающих при циклическом нагружений.

Влияние термической обработки на свойства при циклическом нагружении сплавов, подвергнутых деформационному упрочнению. В связи с улучшением свойств — предела упругости и релаксационной стойкости деформированных сплавов при статическом нагружении в результате низкотемпературного (дорекристаллизационного) отжига было исследовано влияние этого отжига при температуре 150, 250 и 300° С в течение 1 часа на свойства при циклическом нагру-

жении БрОФ6,5-0,15, прокатанной с обжатием 50 и 80%, а также влияние отжига при 300° С, 4 *час* на свойства МНЦ15-20 в особо твердом состоянии.

Установлено, что низкотемпературный отжиг при 150° С, 1 *час* и, особенно при 250° С, 1 *час*, повышает циклическую прочность и циклическую релаксацию БрОФ6,5—0,15 как в твердом, так и особо твердом состоянии. Однако эффект отжига при 250° С, 1 *час* оказался наиболее значительным у бронзы в особо твердом состоянии. Так, предел выносливости на базе $N=5\cdot10^6$ циклов БрОФ6,5—0,15 в особо твердом состоянии в результате отжига при 250° С, 1 *час* возрос ~ на 20%, а циклическая релаксация снизилась примерно в 2 раза. Повышение температуры отжига до 300° С, 1 *час*, которая иногда рекомендуется в литературе, вызывает разупрочнение бронзы и, естественно, значительное снижение ее релаксационной стойкости при циклическом нагружении.

Низкотемпературный отжиг сплава МНЦ15—20 при 300° С, 4 *час* сильно повышает его релаксационную стойкость, снижая от 2 до 20 раз, в зависимости от исходного напряжения изгиба, остаточную деформацию при циклическом нагружении, а также повышает сопротивление сплава усталостному разрушению.

Таким образом, для повышения срока службы и стабильности упругих элементов из БрОФ6,5—0,15, работающих в условиях циклического нагружения, например, различных контактных пружин, следует применять эту бронзу в особо твердом состоянии с последующим отжигом при 250° С, 1 *час*. Этот же режим отжига следует применять и для бронзы в твердом состоянии. Упругие элементы, изготовленные из нейзильбера МНЦ15-20, следует подвергать отжигу при 300° С, 4 *час*.

Исследование анизотропии свойств пружинных сплавов при циклическом нагружении. В связи с различной ориентацией упругих элементов в плоскости листов, получаемых из холоднокатанных материалов, представлялось важным установить оптимальное их расположение с тем, чтобы направление максимальных рабочих напряжений в изделии совпадало с направлением максимальной усталостной прочности материала, что должно обеспечить повышение долговечности этих изделий.

Было исследовано влияние ориентации образцов в плоскости прокатанной ленты на свойства пружинных сплавов БрОФ6,5—0,15, МНЦ15—20, БрБ2,5 и БрБНТ1,9 при циклическом нагружении. Впервые было установлено, что величина

предела выносливости оловянно-фосфористой бронзы в деформированном состоянии отличается определенной анизотропией. При этом предел выносливости поперечных образцов выше, чем продольных образцов. Однако, в области малоцикловой усталости ($N=10^5$ циклов), особенно при высоких напряжениях (т. е. в зоне перегрузок), циклическая прочность бронзы в продольном направлении оказывается более высокой. Образцы, ориентированные в плоскости листа под углами 30, 45 и 60° к направлению прокатки, имеют соответственно промежуточные значения циклической прочности между продольным и поперечным направлениями.

Циклическая прочность бериллиевых бронз БрБ2,5 и БрБНТ1,9 после закалки и старения также выше в поперечном направлении, чем в продольном, хотя, казалось, что при температурах закалки бронзы текстура напряжений прокатанных листов должна устраняться. Установлена также анизотропия величины циклической релаксации сплавов БрОФ6,5-0,15 и МНЦ15-20 в деформированном состоянии и бериллиевой бронзы БрБНТ1,9 после термомеханической обработки. При этом величина циклической релаксации этих сплавов в поперечном направлении оказалась меньше, чем в продольном. Релаксационная стойкость сплава МНЦ15-20 при статическом нагружении также выше в поперечном направлении.

Для выяснения возможной причины анизотропии предела выносливости и циклической релаксации пружинных сплавов нами были определены остаточные напряжения в поверхностных слоях деформированных лент из БрОФ6,5-015 и МНЦ15-20 путем последовательного одностороннего стравливания слоев и определения упругой деформации. Установлено, что в тонком поверхностном слое деформированных (холоднокатанных) лент из БрОФ6,5-015 (степень деформации 50%) и МНЦ15-20 (степень деформации 70%) имеются значительные по величине (от 7 до 20 $кГ/мм^2$) остаточные напряжения, которые в продольном направлении (по отношению к направлению прокатки) лент оказываются растягивающими, а в поперечном — сжимающими. Поэтому из-за сжимающих остаточных напряжений на поверхности предел выносливости и релаксационная стойкость (при циклическом нагружении) лент в поперечном направлении выше, чем в продольном, в котором действуют растягивающие остаточные напряжения. Полученные данные свидетельствуют о том, что одной из основных причин анизотропии циклической прочности и релаксации сплавов в деформированном состоянии, помимо влияния

кристаллической текстуры, является анизотропия зональных напряжений. Однако, не только макроскопические напряжения ответственны за анизотропию циклической прочности. Тот факт, что деформированные ленты из БрБ2,5 и БрБНТ1,9 после закалки и старения отличаются некоторой анизотропией циклической прочности, хотя анизотропии остаточных напряжений в них нет, свидетельствует о том, что определенный вклад в анизотропию циклической прочности, по-видимому, вносит также характер распределения несовершенств строения (текстура дислокаций).

Низкотемпературный отжиг деформированной оловянно-фосфористой бронзы (БрОФ6,5-0,15) и нейзильбера (МНЦ15-20) снижает анизотропию циклической прочности и релаксации за счет снижения уровня зональных напряжений и уменьшения текстуры дислокаций, в результате процессов полигонизации. Однако указанные свойства сплавов при напряжении, не превышающем предела упругости, в поперечном направлении все же лучше, чем в продольном.

Таким образом, при отсутствии пиковых перегрузок в условиях эксплуатации упругих элементов, их вырубку (штамповку) из прокатанных лент рекомендуется проводить так, чтобы направление максимальных действующих напряжений, возникающих в процессе работы упругого элемента в условиях одностороннего изгиба, совпадало с поперечным направлением этих лент. При наличии таких перегрузок или иного характера циклов нагружения упругого элемента, вырубку следует производить таким образом, чтобы направление максимальных напряжений, действующих в упругом элементе, совпадало с продольным направлением прокатанных лент. Так, в работе установлено, что в условиях симметричного цикла нагружения (в отличие от асимметричного) образцы, вырезанные поперек проката, более чувствительны к перегрузкам в области малоцикловой выносливости, чем продольные.

Сравнение величины циклической и статической релаксации (при равных напряжениях и времени нагружения) пружинных сплавов в продольном и поперечном направлении как в деформированном состоянии, так и после различной термической обработки показало, что закономерность ее изменения на первых двух стадиях — начальной ускоренной и последующей замедленной — практически одинакова. Различие между статической и циклической релаксацией составляет стадия, соответствующая значительному возрастанию остаточной деформации перед усталостным разрушением. На-

блюдается также разница в абсолютном значении величины остаточной деформации, возникающей при циклическом и статическом нагружении в процессе соответствующих релаксационных испытаний. Так, остаточная деформация при статическом нагружении сплавов МНЦ15-20, БрБНТ1,9 и БрБ2, подвергнутых термической обработке (низкотемпературный отжиг или старение), по абсолютной величине меньше, чем при циклическом как на продольных, так и на поперечных образцах. Для сплавов БрОФ6,5-0,15 и МНЦ15-20 в деформированном состоянии релаксация напряжений в статических условиях испытания в поперечном направлении лент также меньше, чем в продольном. Однако, в этих сплавах статическая релаксация в продольном направлении заметно больше, чем при циклическом. Для выяснения причины такого различного поведения сплавов при статическом и циклическом нагружении было изучено изменение величины остаточных напряжений в продольных и поперечных образцах из сплавов БрОФ6,5-0,15 и МНЦ15-20 в деформированном состоянии в процессе циклического и статического нагружения.

Установлено, что в процессе этого нагружения сплавов (до 10^4 циклов и при напряжении меньше предела упругости) наблюдается перераспределение остаточных напряжений, в результате которого растягивающие напряжения, которые были на поверхности продольных образцов из указанных сплавов в исходном состоянии, сильно уменьшаются ($\sim$ на 70%), тогда как при статическом нагружении они практически не изменяются. В то же время, циклическое нагружение не приводит к изменению величины сжимающих остаточных напряжений, которые были в поверхностных слоях поперечных образцов в исходном состоянии. Следовательно, когда зональные остаточные напряжения снижены, например, в результате термической обработки, или когда они были сжимающими в исходном состоянии, накопление остаточной деформации при циклическом нагружении идет с большей скоростью, чем при статическом. Наличие растягивающих остаточных напряжений (до испытаний) и снижающихся в процессе циклического нагружения и остающихся практически неизмененными при статическом нагружении приводит к тому, что скорость накопления деформации при статическом нагружении растет и, следовательно, циклическая релаксация оказывается меньше статической.

Влияние состояния поверхности на свойства пружинных сплавов при циклическом нагружении. В условиях изгиба или кручения максимальные напряжения в упругом элемен-

те, как известно, возникают в поверхностных слоях, в которых наибольшей величины обычно достигают остаточные напряжения, концентрируются дефекты строения и действуют концентраторы напряжений за счет рисок, царапин и шероховатости поверхности. Поэтому служебные свойства упругих элементов, особенно тонколистовых, в сильной степени зависят от состояния поверхности в широком смысле этого слова.

В работе установлено, что в результате химического полирования предел выносливости на базе $N=1\cdot10^5$ циклов оловянно-фосфористой бронзы 6,5—0,15 в деформированном состоянии (степень обжатия 50%) возрос с 32 до 35 *кГ/мм*^{2}. Электрохимическое полирование БрОФ6,5-0,15 в особо твердом состоянии привело к еще большему повышению ее предела выносливости на базе $N=5\cdot10^6$ циклов с 27 до 34 *кГ/мм*^{2}. В результате электрохимического полирования, при снятии слоя металла 10 *мк* на сторону ленты толщиной 0,3 *мм*, удалось значительно повысить свойства бериллиевой бронзы БрБНТ1,9 при циклическом нагружении. Так, величина остаточной деформации после циклического нагружения ($\sigma_0=54$ *кГ/мм*^{2} и $N=1\cdot10^3$ циклов) бериллиевой бронзы БНТ1,9 после электрохимического полирования составляет $1{,}67\cdot10^{-4}$%, а для бронзы без этой поверхностной обработки при том же напряжении изгиба и числе циклов — $3{,}34\cdot10^{-4}$%, т. е. вдвое больше. Бронза, подвергнутая электрохимической обработке, не разрушалась до $N=2\cdot10^6$ циклов ($\sigma_0=30$ *кГ/мм*^{2}), в то время как без полирования и при том же напряжении изгиба она разрушилась после $1{,}4\cdot10^5$ циклов.

Известно, что для повышения электропроводности, коррозионной стойкости и др. свойств, токоведущие пружины подвергают различным гальваническим покрытиям, которые влияют на комплекс механических свойств.

Установлено, что гальваническое покрытие бериллиевых бронз БрБНТ1,9 и БрБ2,5 серебром (12—14 *мк*) приводит уже с самых первых циклов нагружения ($\sigma_0=47$ *кГ/мм*^{2}) к 10-кратному увеличению остаточной деформации по сравнению с бронзами без покрытия, а также изменяет зависимость величины остаточной деформации от числа циклов нагружения. Так, остаточная деформация бериллиевых бронз, имеющих покрытие серебром, нарастает до $2\cdot10^3$ циклов нагружения ($\sigma_0=47$ *кГ/мм*^{2}), но при дальнейшем увеличении числа циклов в отличие от бронз без покрытия, происходит снижение величины остаточной деформации вплоть до усталостного разрушения, что связано с уменьшением величины растягивающих напряжений в поверхностных слоях.

Влияние температуры испытания на свойства пружинных сплавов при циклическом нагружении. В настоящее время принято, что упругие элементы большого числа разнообразных приборов должны сохранять стабильность характеристик в области климатических температур — от —60° С до +60° С, а в некоторых приборах от —60° С до +120° С, если эти детали нагреваются за счет выделения тепла при прохождении тока через различные элементы электрической схемы.

Установлено, что с повышением температуры испытания БрОФ6,5-0,15 в деформированном состоянии от +20 до +120° С значительно (в 10—12 раз) снижается релаксационная стойкость при циклическом нагружении ($\sigma_0 = 40$ *кГ/мм*^{2}, $N = 10^5$ циклов), а также снижается ее сопротивление усталостному разрушению. Однако, повышение температуры испытания до указанных пределов практически не влияет на свойства деформированной бронзы, подвергнутой низкотемпературному отжигу по разработанному режиму — при 250° С в течение 1 часа.

У бериллиевой бронзы Б2 повышение температуры испытания от 20 до +120° С при ($\sigma_0 = 62$ *кГ/мм*^{2} и 10^3 циклов) снижает циклическую релаксацию на 20%, а у БрБНТ1,9 при том же напряжении и числе циклов — на 13%, что свидетельствует о большей стабильности при повышенной температуре бериллиевой бронзы с добавкой титана. Снижение температуры испытания от +20 до —60° С не влияет на циклическую прочность и циклическую релаксацию бериллиевых бронз. Однако, изменение температуры испытания от —60 до +120° С практически не оказало влияния на релаксационную стойкость сплава 36НХТЮМ8 и на его сопротивление усталостному разрушению.

Сравнение релаксационной стойкости при циклическом нагружении бериллиевой бронзы БНТ1,9 и аустенитного сплава 36НХТЮМ8 при нормальной температуре показало, что эти сплавы практически одинаковы. Так, величина остаточной деформации сплава 36НХТЮМ8 при циклическом нагружении ($\sigma_0 = 0{,}8\sigma_{\text{пр}}$, $N = 10^4$ циклов) составляет $1{,}7 \cdot 10^{-2}$ %, а остаточная деформация БрБНТ1,9 при равном числе циклов и соответствующем напряжении ($\sigma_0 = 0{,}8\sigma_{\text{упр}}$) — $1{,}6 \cdot 10^{-2}$ %. Однако при температуре испытания +120° С более стабильнее оказывается сплав 36НХТЮМ8.

Исследование влияния циклического нагружения на структуру и свойства пружинных сплавов. В работе изучалось изменение микроструктуры и субструктуры сплавов с решеткой ГЦК—МНЦ15-20 и 36НХТЮМ8 при циклическом нагружении.

Показано, что в начальной стадии циклического нагружения в отдельных зернах сплава МНЦ15-20 появляются тонкие линии скольжения. С увеличением числа циклов нагружения интенсивность и ширина некоторых из этих линий за счет накопления дефектов строения увеличивается, затем происходит слияние их в грубые полосы скольжения, которые и являются очагами развивающегося в дальнейшем от них или в них усталостного разрушения. Электронномикроскопическое исследование «на просвет» позволило установить, что циклическое нагружение аустенитного сплава 36НХТЮМ8, предварительно деформированного растяжением, сильно изменяет субструктуру — повышается плотность дислокаций с образованием скоплений — барьеров со сложным распределением дислокаций, особенно в поверхностных слоях образцов. Напротив, в срединных слоях образцов дислокационная структура практически не изменилась. Рентгеноструктурный анализ показал, что в начальной стадии циклического нагружения происходит упрочнение этого сплава, связанное с развитием субструктуры и возникновением микронапряжений, которые релаксируют как при возникновении субмикроскопических трещинок в начальной стадии циклического нагружения, так и при развитии их в дальнейшем в трещину усталости.

Установлено, что в процессе циклического нагружения БрОФ6,5-0,15 и сплава 36НХТЮМ8 происходит непрерывное повышение удельного электросопротивления, свидетельствующее о накоплении в сплавах дефектов строения в процессе усталостных испытаний. Тенденция к более интенсивному повышению величины удельного сопротивления сплавов особенно заметна в период, когда субмикроскопические трещины достигают размеров микротрещин, т. е. к моменту, приближающемуся к началу усталостного разрушения.

Исследовано влияние циклического нагружения на изменение основных свойств пружинных сплавов — модуль нормальной упругости и предел упругости сплава 36НХТЮМ8, бериллиевых бронз Б2,5 и БНТ1,9, в том числе и после покрытия их серебром, в интервале температур от —60 до +120° С. Установлено, что изменение величины модуля нормальной упругости указанных разных сплавов в процессе циклического нагружения имеет общие характерные черты. В начале испытания — после 500—1000 циклов нагружения — происходит небольшое увеличение значения модуля нормальной упругости (на 0,5% для сплава 36НХТЮМ8 и на 2,5% для бериллиевых бронз), далее следует его снижение, которое к моменту разрушения сплавов составляет 0,5% от исход-

ного значения. Эти изменения модуля нормальной упругости в процессе циклического нагружения пружинных сплавов, должны учитываться при оценке стабильности характеристик высокоточных упругих элементов в процессе их службы.

Показано, что в начале циклического нагружения происходит некоторое повышение предела упругости бериллиевых бронз и сплава 36НХТЮМ8, связанное с возрастанием плотности дислокаций и появлением полезных остаточных напряжений, которое практически сохраняется вплоть до усталостного разрушения сплавов.

Выводы

1. Исследованы свойства пружинных сплавов, наиболее широко применяющихся в промышленности для изготовления упругих элементов ответственного назначения: оловянно-фосфористой бронзы (БрОФ6,5-0,15), нейзильбера (МНЦ15-20), бериллиевых бронз (БрБ2, БрБ2,5 и БрБНТ1,9), и аустенитного сплава (36НХТЮМ8) при циклическом нагружении.

2. Разработаны конструкции установок и методика испытаний тонколистовых пружинных материалов на усталость и циклическую релаксацию в условиях одностороннего чистого изгиба в интервале температур от —60 до +120° С.

3. Установлено соответствие между значениями циклической прочности в условиях асимметричного (повторного) цикла нагружения тонколистовых образцов, испытанных по разработанной методике, и упругих элементов (сильфонов) из бериллиевых бронз. Это указывает на то, что по разработанной методике испытания на усталость можно судить о циклической прочности изделий.

4. Установлено, что циклическая релаксация различных по составу и способам упрочнения пружинных сплавов с решеткой ГЦК, определяемая по величине остаточной деформации, накапливаемой при циклическом нагружении сплавов, характеризуется тремя основными стадиями: ускоренный рост, замедленный рост и период быстрого нарастания остаточной деформации, завершающийся усталостным разрушением. По результатам определения циклической релаксации должно устанавливаться предельное число циклов нагружения, при котором служебные характеристики упругого элемента не будут выходить за пределы заданных допусков и это испытание сплавов должно быть введено в технические условия.

5. Установлено, что в процессе циклического нагружения пружинных сплавов в условиях одностороннего чистого изги-

ба, в отличие от статического нагружения, наблюдается перераспределение остаточных напряжений, в результате которого растягивающие напряжения на поверхности образцов уменьшаются, а сжимающие остаются практически неизменными.

6. Показано, что остаточная деформация, возникающая в процессе определения релаксации напряжений в условиях статического нагружения, отличается по характеру своего изменения (сначала быстрый, а затем замедленный рост) от наблюдающегося при циклическом нагружении. По абсолютной величине циклическая релаксация обычно выше статической, если в образцах не происходит снижения остаточных растягивающих напряжений в поверхностных слоях, которые были в исходном состоянии.

7. Установлено, что повышение деформационного упрочнения БрОФ6,5-0,15 приводит к увеличению циклической прочности, а также сильно (в 5—6 раз) снижает величину циклической релаксации. Поэтому для повышения стабильности свойств упругих элементов из БрОФ6,5-0,15, работающих при циклическом нагружении, рекомендуется применять бронзу в особо твердом состоянии вместо твердого.

Показано, что термомеханическая обработка бериллиевой бронзы БрБНТ1,9 по технологической схеме: закалка при 780° С, холодная пластическая деформация с обжатием 30% и старение при 320° С, 2 *час* повышает циклическую прочность и снижает циклическую релаксацию по сравнению с двойной термической обработкой (закалка и старение).

8. Показано, что бериллиевая бронза БрБНТ1,9 характеризуется большей стабильностью свойств при циклическом нагружении, чем БрБ2, так как она обладает меньшей циклической релаксацией и большей циклической прочностью. Поэтому для контактных пружин и других упругих элементов, работающих при циклическом нагружении, рекомендуется применение бериллиевой бронзы, легированной титаном (БрБНТ1,9), вместо БрБ2 или более дорогой БрБ2,5, что должно обеспечить большую стабильность их работы.

9. Установлено, что низкотемпературный отжиг БрОФ6,5-0,15 по разработанному оптимальному режиму — при 250° С, 1 *час* и МНЦ15-20 при 300° С, 4 *час* снижает величину циклической релаксации для первого сплава в 2 раза (для особо твердого состояния) и от 2 до 20 раз, в зависимости от действующего напряжения, для второго сплава (особо твердое состояние) и повышает сопротивление усталостному разрушению, особенно при напряжениях, близких к пределу вы-

носливости. Низкотемпературный отжиг БрОФ6,5-0,15 при 250° С, 1 *час* и МНЦ15-20 при 300° С, 4 *час* включен в РТМ ряда отраслей промышленности.

10. Установлено, что циклическая прочность и циклическая релаксация пружинных сплавов как в деформированном состоянии (БрОФ6,5-0,15, МНЦ15-20), так и после термической и термомеханической обработки (сплавы: БрОФ6,5-0,15, МНЦ15-20, БрБ2, БрБ2,5, БрБНТ1,9) являются анизотропными свойствами. Поэтому выбор направления вырубки и штамповки упругих элементов из холоднокатанной ленты должен производиться с учетом анизотропии указанных свойств пружинных сплавов. Анизотропия сплавов БрОФ6,5-0,15 и МНЦ15-20 может быть уменьшена после низкотемпературного отжига по рекомендуемым режимам.

11. Установлено, что применение методов химического и электрохимического полирования тонких лент и полос со снятием с поверхности тонких лент слоя 10 *мк* существенно повышает циклическую прочность и снижает циклическую релаксацию пружинных сплавов.

12. Показано, что нанесение гальванических покрытий (серебро) сильно увеличивает циклическую релаксацию бериллиевых бронз, а также изменяет характер зависимости накопления величины остаточной деформации от числа циклов нагружения.

13. Повышение температуры испытания от +20 до +120° С бериллиевых и оловянно-фосфористой бронз увеличивает на 10—15% циклическую релаксацию и снижает циклическую прочность и практически не влияет на указанные свойства сплава 36НХТЮМ8. Снижение температуры испытания от +20 до —60° С не влияет на свойства всех исследованных пружинных сплавов при циклическом нагружении.

14. Изучено изменение микроструктуры и субструктуры сплавов с решеткой ГЦК (МНЦ15-20, 36НХТЮМ8) при циклическом нагружении методом оптического, электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализа и отмечены изменения, предшествующие усталостному разрушению.

15. Изучено изменение модуля нормальной упругости, предела упругости и удельного электросопротивления сплавов в процессе циклического нагружения в интервале температур от —60 до +120° С. Установленные изменения модуля упругости должны учитываться при определении стабильности работы упругих элементов.

Разработанные испытательные установки и методики, установленные характеристики циклической прочности и релаксации, а также рекомендации по применению и обработке основных пружинных сплавов переданы в промышленость и получили практическое использование.

*
* *

Основные результаты работы опубликованы в следующих статьях:

1. **Ионычев Г. С., Прокошкин Д. А., Рахштадт А. Г., Каткова Л. В.** Релаксация напряжений в пружинных сплавах при циклическом нагружении. В сб. «Современные пружинные материалы», изд. «Знание», Л., 1967.

2. **Ионычев Г. С.** Методы повышения усталостной прочности пружинной бронзы ОФ6,5-0,15. В сб. «Повышение надежности пружин», изд. «Знание», Л., 1965.

3. **Ионычев Г. С., Рахштадт А. Г.** Новый метод циклического испытания тонколистовых материалов. Передовой научно-технический и производственный опыт, № 2-64-417/12, ГОСИНТИ, Москва, 1964.

4. **Ионычев Г. С., Мишкевич Р. И., Рахштадт А. Г., Шолтмир Л. Г.** Влияние холодной пластической деформации и термической обработки на упругие свойства и усталостную прочность славов МНЦ15-20 и БрОФ6,5-0,15. Вопросы радиоэлектроники, выпуск 10, серия IV, 1964.

5. **Ионычев Г. С., Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г., Комиссарова Н. Ф.** Влияние микролегирования и термомеханической обработки на усталостную прочность и циклическую релаксацию пружинных сплавов на медной основе. «Известия высших учебных заведений. Машиностроение», I, 1968.

Результаты работы доложены на следующих семинарах и совещаниях:

1. Всесоюзный семинар «Повышение надежности пружин», Ленинград, март 1965 г.

2. IV Всесоюзное совещание по усталости металлов, Институт металлургии им. Байкова АН СССР, 1966 г.

3. Всесоюзный семинар «Современные пружинные сплавы, их обработка и испытания», Ленинград, апрель 1967 г.

Л-79409 от 7/IV—69 г. Тип. МВТУ Объем 1 п. л. Зак. 581. Тир. 150