

487288
Научно-производственное предприятие "Полигон МТ"

- 6 -

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

Воробьева Ирина Геннадьевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО
СТАРЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ ПРУЖИННЫХ СТАЛЕЙ ПЕРЛИТНОГО
КЛАССА ПОСЛЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ НА НИЖНИЙ
БЕЙНИТ С ЦЕЛЮЮ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРУЖИН

Специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая
обработка металлов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1993 г.

И.В. Воробьева

Работа выполнена в Научно-производственном предприятии "Полигон МТ" и в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор А.Г. Рахштадт

Официальные оппоненты - доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
В.М. Блинов

кандидат технических наук,
начальник лаборатории
Т.И. Луценко

Ведущая организация - Государственное предприятие "Производственное объединение Красногорский завод им. Заватова"

Защита диссертации

на заседании
го государственного
по адресу: 107

Ваш отзыв
печатью, просим
С диссертацией
Н.Э. Баумана.

Желающие
менно должны
защиты на имя
263 - 65 - 14.

Автореферат
УЧЕБНО-НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ
К. Т. Н.

Подписано к печати
заказ № 283

1187288

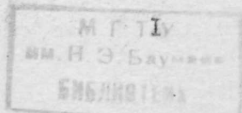
Актуальность проблемы. Развитие машиностроения предъявляет все более высокие требования к пружинам машин и механизмов. Необходимость повышения стабильности и долговечности упругих элементов — одна из наиболее острых проблем машиностроения. Среди различных методов ее решения, включающих термическую и термомеханическую обработку, особое место занимает способ динамического старения (ДС) пружинных сталей, позволяющий существенно повысить весь комплекс механических свойств, но особенно сопротивление малым пластическим деформациям в условиях кратковременного и длительного нагружения, т.е. тех свойств, которые определяют качество пружинных сталей и самих упругих элементов.

Известен процесс ДС сталей после их закалки с образованием структуры мартенсита и отпуска. На его основе созданы технологические процессы упрочняющей обработки пружин, часть из которых успешно внедрена в промышленность.

Однако не изучена возможность использования ДС сталей после изотермической закалки с образованием структуры нижнего бейнита, хотя это структурное состояние имеет несомненную общность с получаемым в результате обычной закалки и низкого отпуска — термической обработки, для которой эффективность динамического старения уже известна. К тому же, непосредственно после изотермической закалки сталь должна иметь значительно меньшую склонность к хрупкому разрушению, чем после обычной закалки и низкого отпуска. Кроме того, изотермическая закалка отличается рядом известных технологических преимуществ: возможностью реализации заданных размеров упругих элементов вследствие отсутствия деформации и коробления.

Есть данные, что при применении изотермической закалки на нижний бейнит с последующим отпуском в сталях достигается более высокий предел упругости, чем после обычной закалки и отпуска при равной прочности. Поэтому можно ожидать, что сталь после изотермической закалки и ДС при одновременном развитии процессов отпуска будет иметь высокое сопротивление малым пластическим деформациям при более высоком сопротивлении разрушению.

Учитывая сказанное, несомненно целесообразно применить



процесс ДС к пружинным сталям, подвергнутым изотермической закалке на нижний бейнит.

Цель работы. Разработка и изучение нового метода упрочняющей обработки легированных пружинных сталей перлитного класса на основе использования процесса ДС после их предварительной изотермической закалки с образованием структуры нижнего бейнита.

Научная новизна. Установлена связь между исходным структурным состоянием стали, полученным после изотермической или термической обработки и эффектом динамического старения. Показано, что оптимальное структурное состояние, обеспечивающее максимальный эффект упрочнения свойств в результате динамического старения, отвечает присутствию в основном нижнего бейнита при небольшом количестве мартенсита и при минимальном содержании непревращенного аустенита, что достигается после изотермической закалки при температуре несколько ниже M_n и отпуска. Показано, что при динамическом старении замедляется превращение остаточного аустенита по сравнению с обычным отпуском при равных температурах. Определено, что высокая степень превращения остаточного аустенита после изотермической закалки достигается в результате последующего отпуска в районе 250–300 °С или применения холодной пластической деформации, что обеспечивает в условиях последующего динамического старения достижение высокого уровня свойств прочности, но особенно сопротивления малым пластическим деформациям. Определены оптимальные значения основных параметров динамического старения легированных пружинных сталей перлитного класса после изотермической закалки, обеспечивающие достижение высокого уровня упрочнения, особенно сопротивления малым пластическим деформациям при повышенном сопротивлении разрушению.

Практическая ценность работы. На основе установленных закономерностей разработана технология нового процесса упрочнения пружин из легированных пружинных сталей, основанная на использовании изотермической закалки, отпуска и динамического старения. Процесс опробован при обработке пружин из сталей 50ХФА и 65С2ВА, используемых в конструкциях форсунки

и механизма автоматического открывания борта прицепа. Показано, что этот процесс повышает усталостную прочность, уменьшает величину релаксации напряжений и в итоге повышает эксплуатационную надежность пружин. Указанные процессы рекомендованы для внедрения в соответствующей отрасли.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на краткосрочном семинаре "Новые стали и сплавы, режимы их термической обработки", г. Ленинград, 1989 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 статьи, получено 1 авторское свидетельство на изобретение.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных выводов и 6 приложений. Работа изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок, 16 таблиц и список литературы из 80 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработки и исследования динамического старения пружинных сталей после изотермической закалки на нижний бейнит и сформулирована цель работы.

В первой главе представлен обзор имеющихся в литературе данных по легированию и способам термической и термомеханической обработки, по влиянию динамического старения на структуру и механические свойства углеродосодержащих пружинных сталей, закаливаемых на мартенсит.

В СССР и за рубежом для изготовления пружин наиболее широко применяются легированные стали перлитного класса марганцовистые, хромомарганцевые, кремневольфрамовые, кремнемарганцовистые, хромомарганганцевованадиевые и другие.

Пружины из этих сталей для упрочнения обычно подвергают закалке и отпуску или изотермической закалке. Для таких сталей как 65Г, 50ХФА, 50ХГ, 50ХГФА, 60С2, 60С2ХА и 65С2ВА характерна общая закономерность изменения свойств в зависимости от условий закалки и отпуска. После отпуска при температуре, соответствующей достижению максимума предела упругости, легированные стали обладают и наибольшей усталостной прочностью и максимальной релаксационной стойкостью.

Для некоторых пружинных сталей, особенно кремнистых, весьма эффективна изотермическая закалка с последующим от-

пуском. Таким способом можно получить сочетание высокого сопротивления малым пластическим деформациям с повышенным уровнем пластичности и ударной вязкости стали.

Весьма эффективно применение окоротного нагрева для закалки пружинных сталей либо при использовании ТВЧ, либо нагрева при пропускании тока. В этом случае измельчается зерно и фиксируется повышенная плотность строения. В результате скоростной закалки улучшается весь комплекс свойств. Благодаря более короткому времени нагрева снижается обезуглероживание, что также улучшает свойства пружин. Отпуск с использованием скоростного нагрева (электроотпуск) весьма эффективен для повышения пластичности и вязкости, сопротивления замедленному разрушению и усталостной прочности этих сталей по сравнению с обычным отпуском.

Применение ВТМО и других технологических схем ТМО позволяет повысить сопротивление разрушению, предел упругости, усталостную прочность стали, однако их реализация в промышленности вызывает ряд трудностей.

Одной из разновидностей термомеханической обработки является метод динамического старения (ДС) или отпуска под нагрузкой, который может быть легко реализован в промышленности — непосредственно на машиностроительном или приборостроительном предприятии. ДС значительно увеличивает сопротивление малым пластическим деформациям (предел упругости), усталостную прочность и релаксационную стойкость, предел выносливости стали, уменьшает склонность к хрупкому разрушению, снижает эффект Баушингера и температуру перехода от вязкого состояния к хрупкому.

При объяснении причин повышения уровня механических свойств в результате ДС трудно выявить одну главную из них. Вероятно, речь идет о получении в результате ДС особого структурного состояния, отличающегося от получаемого в результате обычного отпуска. Это структурное состояние, формирующееся в процессе ДС, связано, прежде всего, с прямым влиянием "свежих" дислокаций, возникающих в процессе нагружения, на миграцию атомов внедрения, на формирующуюся дислокационную структуру и на условия выделения карбидов. В итоге возрастает дисперсность этих карбидов, изменяется их морфология и ориентировка их решетки при более равномерном распределении.

Во второй главе приведено обоснование выбора материала, режимы термической обработки и описаны методики экспериментальных исследований.

Объектом исследования были две широко применяющиеся для изготовления упругих элементов ответственного назначения легированные пружинные стали перлитного класса 50ХФА и 65С2ВА, различающиеся по устойчивости переохлажденного аустенита в области температур бейнитного превращения и его кинетикой, а также по интенсивности процессов, происходящих при отпуске.

По составу стали соответствовали ГОСТ 14959-79. В проволоке из исследуемых сталей не было расслоения, количество примесей, неметаллических включений было в пределах ГОСТ на сталь высококачественную.

Предварительную закалку проводили с нагревом в соляной ванне при 850-860 °С и охлаждением в масле и изотермическую с выдержками при температуре несколько ниже и выше мартенситной точки, которая специально определялась.

ДС и измерение механических свойств проводили в основном в условиях кручения.

Процесс распада переохлажденного аустенита при закалке исследовали в основном магнитным методом. Структурное состояние изучали с применением металлографического и рентгенографического методов, а также электронной микроскопии.

Третья глава посвящена изучению влияния отпуска на механические свойства и структуру сталей 50ХФА и 65С2ВА после обычной и изотермической закалки.

В первую очередь, была изучена кинетика изотермического превращения переохлажденного аустенита в области температур бейнитного превращения и определены мартенситные точки исследуемых сталей. Для стали 50ХФА $M_H = 240$, а для стали 65С2ВА $M_H = 210$ °С. Для исследования кинетики превращения были выбраны температуры, позволяющие фиксировать различное структурное состояние сталей: 1) нижний бейнит и остаточный аустенит - при изотермической выдержке выше M_H и 2) мартенсит, нижний бейнит и остаточный аустенит - при изотермической выдержке ниже M_H . Это исследование было необходимо в конечном счете для того, чтобы определить влияние исходной структуры и, в частности, присутствия в ней остаточного аустенита при раз-

личной степени его обогащения углеродом и, следовательно, при разной устойчивости к превращению, на уровень механических свойств, получаемых в результате ДС. Кроме того, для сравнения было изучено влияние структуры, формирующейся после закалики на мартенсит и последующего отпуска, в том числе и в условиях ДС.

Были определены степени превращения аустенита в нижний бейнит в сталях 50ХФА и 65С2ВА, определяемые продолжительностью изотермической выдержки, отвечающие максимальному упрочнению при температуре ниже и выше M_n .

Электронномикроскопическим методом установлено, что в структуре кремневольфрамовой стали после низкой изотермической закалики (температура изотермической выдержки 200 °С в течение 1 ч) присутствуют кристаллы нижнего бейнита, мартенсита, частицы δ -карбида пластинчатой морфологии и остаточный аустенит, имеющий расслоение по составу, о чем свидетельствует расщепление рефлексов от плоскостей с одинаковыми индексами на микродифрактограмме (в рефлексе остаточного аустенита).

Поскольку при ДС после изотермической закалики неизбежно происходит отпуск, правда в более сложных условиях из-за одновременного действия напряжений от внешней нагрузки, чем без этих напряжений, последний процесс изучался для сравнения, тем более, что отпуск после изотермической закалики на нижний бейнит изучен в весьма ограниченной степени, хотя он может быть перспективным.

Характер изменения механических свойств исследуемых сталей от температуры отпуска после изотермической закалики, независимо от температуры превращения в области точки M_n и после обычной закалики достаточно сходен, и хотя после изотермической закалики наблюдаются свои особенности изменения свойств в процессе отпуска, максимальные значения пределов упругости обеих сталей после изотермической закалики и отпуска оказываются выше, чем после обычной закалики и отпуска. Кроме того, обе исследованные стали при достижении максимума предела упругости в результате отпуска после изотермической закалики имеют сопротивление хрупкому разрушению значительно выше, чем после обычной закалики и отпуска (см. табл. I).

Таблица I

Влияние температуры отпуска на механические свойства сталей 50ХФА и 65С2ВА после закалки по различным режимам

Предварительная термическая обработка	Температура отпуска, °C	Свойства					
		$H_{кв}$	$R_{0,005}$ МПа	$R_{0,02}$ МПа	$R_{0,1}$ МПа	R_s МПа	n
Сталь 50ХФА							
Изотермическая	без отпуска	610	360	510	880	1760	8
закалка с выдерж-	250	610	510	760	1150	1660	6
кой при 200 °C	300	590	560	830	1220	1510	8
60 мин.	350	490	750	910	1270	1370	2
	400	490	770	990	1130	1320	4
	450	490	830	940	1080	1260	14
	500	460	510	610	670	1130	23
Изотермическая	без отпуска	460	600	830	1010	1300	20
закалка с выдерж-	350	490	700	790	910	1200	21
кой при 300 °C	400	470	680	800	990	1190	26
20 мин.	450	420	650	800	960	1180	22
Закалка в масле	без отпуска	730	355	530	1065	1940	5
	250	660	625	820	1160	1800	4
	300	570	740	980	1170	1640	2
	350	490	740	890	1085	1510	15
	400	490	700	875	1050	1430	18
	450	460	535	720	1009	1300	32
Сталь 65С2ВА							
Изотермическая	без отпуска	890	180	440	760	1920	6
закалка с выдерж-	300	610	510	690	1140	1700	10
кой при 200 °C	350	540	590	730	1140	1620	8
60 мин.	400	490	420	540	1130	1460	5
Изотермическая	без отпуска	680	320	420	680	1380	14
закалка с выдерж-	300	680	420	560	860	1350	14
кой при 300 °C	350	660	540	620	950	1330	14
20 мин.	400	660	560	620	960	1300	13
	450	620	570	670	960	1270	12
Закалка в масло	без отпуска	970	230	350	1180	1200	1
	350	680	400	500	1100	1380	5
	400	555	520	810	1260	1530	2
	450	520	460	850	1200	1340	20

По данным электронномикроскопического исследования в результате отпуска при 250 °С стали 65С2ВА после низкой изотермической закалки теряется четкость кристаллов α -фазы, а наряду с δ -карбидом присутствует цементит.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния ДС на структуру и механические свойства сталей 50ХФА и 65С2ВА после обычной и изотермической закалки и определено влияние исходной структуры на уровень механических свойств, получаемый в результате ДС, влияние параметров которого было подробно изучено. На основании проведенных исследований следует считать, что оптимальным уровнем напряжений при ДС сталей после изотермической закалки на нижний бейнит является предел текучести при температуре ДС, а оптимальной продолжительностью — 40 мин. Именно поэтому все дальнейшие обработки по типу ДС при исследованиях проводились в этих условиях.

Был исследован весь комплекс механических свойств, получаемый в процессе этой обработки для обеих исследуемых сталей после изотермической закалки и обычной закалки с отпуском. Напряжения, действующие в процессе ДС, в наибольшей степени сказываются не на росте величины сопротивления малым пластическим деформациям, меньше — на повышении уровня предела текучести и почти не влияют на изменение временного сопротивления. Наиболее высокие значения предела упругости достигаются в том случае, когда в течение всего процесса ДС в стали действуют повышенные напряжения, когда степень их релаксации относительно небольшая, т.е. когда они в течение всего процесса ДС близки по величине к пределу текучести. Это можно предположительно объяснить следующим образом.

В процессе ДС происходит перестройка и фиксирование дислокационной структуры, ориентированное выделение δ -карбида в поле напряжений от внешней нагрузки, которое в этих условиях уравнивает возникшие при этом упругие поля микроискажений. При этом, чем выше уровень приложенных в процессе ДС напряжений, тем полнее происходит перестройка структуры. При разгрузке образца уравнивающие напряжения от внешней нагрузки, естественно, отсутствуют, и поля микроискажений проявляют себя сильнее, что и отражается на росте уширения интерференционной линии (211) $_{\alpha}$ (см. табл. 2, 3).

Таблица 2

Структурное состояние стали 50ХФА после
изотермической закалки

Режим термической обработки	$\tau_{\text{доос}},$ МПа	β_{α} , мрад
1. Из. зак. при 200 °С	360	18,4
2. То же и отпуск при 250 °С	510	17,4
3. То же, что 1, и ДС при 250 °С	860	19,2
4. То же, что 2, и ДС при 250 °С	1040	18,6
5. Из. зак. при 300 °С	610	15,3
6. То же и отпуск при 250 °С	650	13,3
7. То же, что 5, и ДС при 250 °С	880	16,8

Количество $A_{\text{ост.}}$ после указанных обработок в пределах
5-7 %.

Таблица 3

Структурное состояние стали 65С2ВА после
изотермической закалки

Режим термической обработки	$\tau_{\text{доос}},$ МПа	$A_{\text{ост.}}, \%$	β_{α} , мрад
1. Из. зак. при 200 °С	280	16	18,9
2. То же и отпуск при 300 °С	380	12	15,4
3. То же, что 1, и ДС при 300 °С	650	12	18,9
4. То же, что 2, и ДС при 300 °С	1100	10	16,8
5. Из. зак. при 300 °С	320	25	9,6
6. То же и отпуск при 300 °С	420	13	14
7. То же, что 5, и ДС при 300 °С	620	22	13,6

по сравнению с наблюдающейся после отпуска при той же температуре, но без напряжений. Если предположить, что результирующий суммарный вектор упругих полей микроискажений направлен противоположно внешней нагрузке, действовавшей при ДС, то при выполнении последующих механических испытаний с нагружением в том же направлении, как и при предшествующем ДС, микроискажения будут ослаблять действие внешней нагрузки, и в стали в меньшей степени будут развиваться процессы микропластической деформации.

Этим можно предположительно частично объяснить наблюдаемое в результате ДС существенное повышение предела упругости по сравнению с отпуском без приложения внешней нагрузки, учитывая различие в исходных структурных состояниях сталей.

Было исследовано влияние исходного структурного состояния на уровень механических свойств сталей, получаемый в результате ДС (см. рис. 1), и выявлены следующие закономерности:

1) Если в исходной структуре присутствует мартенсит, то уровень достигаемого в результате ДС предела упругости выше, чем при отсутствии мартенсита в исходной структуре. Причем, в стали без остаточного аустенита в исходной структуре влияние присутствующего мартенсита меньше, и, соответственно, меньше различие значений $\sigma_{0,005}$, чем в стали с аустенитом.

2) Если в исходной структуре есть остаточный аустенит (сталь 65С2ВА), то уровень достигаемого в результате ДС предела упругости тем выше, чем меньше его количество в исходной структуре, поскольку все структурные изменения при ДС происходят в α -фазе.

3) Если в исходной структуре нет остаточного аустенита, то при равном значении $\sigma_{0,005}$ сопротивление разрушению после изотермической закалки и ДС выше, чем после обычной закалки, отпуска и ДС.

4) Если в исходной структуре есть остаточный аустенит, то при максимальном значении $\sigma_{0,005}$ после изотермической закалки и ДС значения характеристики сопротивления разрушению выше, чем после обычной закалки, отпуска и ДС.

Кроме того, проведенными исследованиями доказано, что при ДС превращение остаточного аустенита идет менее интенсивно, чем при отпуске без приложения напряжений (см. табл. 3).

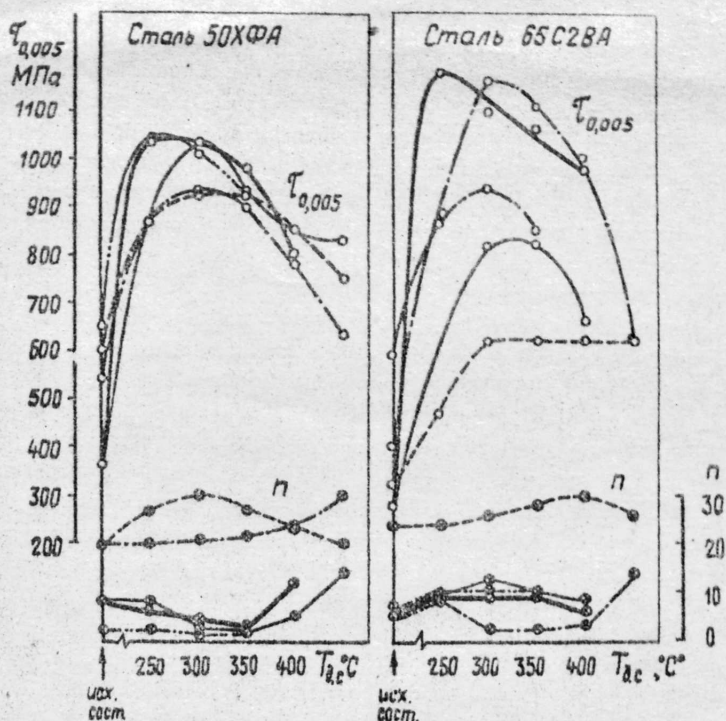


Рис.1. Влияние исходной термической обработки на $\sigma_{0.005}$ и n сталей 50ХФА и 65С2ВА после ДС. Исходное состояние:

- · — · — закалка и отпуск при 300 °C (ст.50ХФА) и при 250 °C (ст.65С2ВА, 12 % $A_{ост}$);
- · — — закалка и отпуск при 450 °C (ст.50ХФА) и при 350 °C (ст.65С2ВА, 9 % $A_{ост}$);
- — — — — изотермическая закалка при 300 °C (25 % $A_{ост}$ в ст.65С2ВА);
- — — — — изотермическая закалка при 200 °C (16 % $A_{ост}$ в ст.65С2ВА);
- — — — — то же и отпуск при $T_{отп.} = T_{д.с.}$ (9 % $A_{ост}$ в ст.65С2ВА).

Это связано, по-видимому, с большей дефектностью строения аустенита в условиях ДС, которая обусловлена деформацией ползучести в нем, вызванной достаточно длительно действующими в этих условиях напряжениями при повышенной температуре, а это определяет большее упрочнение аустенита и затруднение процесса сдвига при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении.

Таким образом, в результате ДС после изотермической закалки на нижний бейнит по другим исследованным схемам, получен высокий комплекс прочностных свойств сталей, который, однако, в кремневольфрамовой стали несколько уступает уровню, достигнутому после обычной закалки, отпуска и ДС, что связано с большим количеством остаточного аустенита в ее исходной структуре и замедлением его превращения при ДС, но сопротивление разрушению сталей, обработанных по первому режиму, значительно превосходит достигнутое в последнем случае, так как изменяется механизм разрушения от вязкого к хрупкому.

В пятой главе приведены результаты исследования влияния различных способов превращения остаточного аустенита сталей после изотермической закалки на эффективность последующего ДС.

Известно, что остаточный аустенит может претерпевать превращение при низкотемпературном охлаждении, в процессе пластической деформации и, наконец, при отпуске. Были исследованы все эти три возможных способа превращения и оценена их эффективность для повышения сопротивления малым пластическим деформациям стали в условиях ДС после изотермической закалки.

Обработка холодом после изотермической закалки приводит в результате ДС к росту пределов упругости, текучести и временного сопротивления, но из-за высокой устойчивости остаточного аустенита к превращению в кремневольфрамовой стали не очень значительно, и при этом снижается сопротивление разрушению.

Гораздо более эффективным путем повышения уровня свойств прочности является пластическая деформация. Она может быть осуществлена в стали после изотермической закалки, и притом со значительными степенями, из-за присутствия в ее структуре повышенного количества остаточного аустенита и достаточно пластичного нижнего бейнита, по сравнению с мартенситом закалки. Комплекс значений свойств прочности: $\sigma_{0,005} = 1530$ МПа, $\sigma_{0,02} = 1630$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1860$ МПа, $\sigma_B = 2120$ МПа, - стали 65С2ВА, полученный после низкой изотермической закалки, пластической де-

формации кручением 5 % и ДС при 300 °С, является рекордным для этой стали, при этом показатель сопротивления разрушению хотя и сниженный ($n = 2$), но на уровне n , полученного после обычной закалки, отпуска и ДС, когда уровень предела упругости максимальный для этой обработки $\sigma_{0,005} = 1160$ МПа.

Поскольку применение отпуска после изотермической закалки повышает уровень предела текучести сталей и тем самым позволяет повысить уровень напряжений, действующих при ДС, то стали после низкой изотермической закалки, отпуска и ДС при 250 °С имеют максимально высокий комплекс механических свойств прочности и сопротивления разрушению, которое уже носит вязкий характер. Хромванадиевая сталь: $\sigma_{0,005} = 1040$ МПа, $\sigma_{0,02} = 1180$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1380$ МПа, $\sigma_b = 1670$ МПа, $n = 6$. Кремнийвольфрамовая сталь: $\sigma_{0,005} = 1180$ МПа, $\sigma_{0,02} = 1270$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1530$ МПа, $\sigma_b = 1800$ МПа, $n = 9$. После подосной обработки достигается высокий уровень свойств стали 65С2ВА и в условиях растяжения: $\sigma_{0,005} = 2120$ МПа, $\sigma_{0,2} = 2350$ МПа, $\sigma_b = 2430$ МПа, $\psi = 35$ %, $\delta = 4,3$ %.

По данным электронномикроскопического исследования приме-
нерче ДС при 250 °С стали 65С2ВА после низкой изотермической закалки и отпуска при 250 °С вызывает существенные изменения тонкой структуры. Так, субзерни α -фазы после ДС оказываются более мелкими, а их фрагментация более выраженной, чем после аналогичной обработки, но без ДС, что свидетельствует о повышении плотности дислокаций и их смещении к субграницам, на которых они и закрепляются под действием напряжений от внешней нагрузки в условиях повышенных температур.

Степень релаксации напряжений в сталях после низкой изотермической закалки, отпуска и ДС достаточно низкая, но при применении нескольких повторных циклов отпуска и ДС можно получить еще более низкую степень релаксации напряжений. Однако при этом снижается сопротивление разрушению, которое приобретает крупный характер, вероятно, из-за деформационного старения. Однако уровень свойств прочности достаточно высокий: $\sigma_{0,005} = 1340$ МПа, $\sigma_{0,02} = 1410$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1600$ МПа, $\sigma_b = 1700$ МПа, $n = 2$, — хотя и ниже, чем при использовании дополнительной (до ДС) пластической деформации.

Таким образом, по результатам исследований можно заключить, что оптимальным режимом упрочняющей обработки легиро-

важных пружинных сталей перлитного класса является: изотермическая закалка при температуре ниже M_N , отпуск при 250 °C и ДС при той же температуре в течение 40 мин и напряжения, равном пределу текучести. В этом случае достигается максимальный комплекс механических свойств пружинных сталей перлитного класса (50ХФА, 65С2ВА).

Шестая глава посвящена промышленному опробованию опытных партий пружины форсунки из стали 50ХФА и пружины механизма автоматического открывания борта прицепа из стали 65С2ВА, термически обработанных по найденным оптимальным режимам с применением изотермической закалки, отпуска и динамического старения, и разработке рекомендаций по изменению существующего технологического процесса.

Испытания показали, что пружины, обработанные по опытной технологии, имеют меньшее коробление в процессе закалки, что позволило исключить трудоемкую операцию правки пружин, и меньшую усадку при циклическом нагружении.

Изменения к технологическим процессам рекомендованы к внедрению на Челябинском моторном заводе и Ороком заводе тракторных прицепов.

ВЫВОДЫ

1. Установлена связь между исходным структурным состоянием стали, полученным после термической (изотермической) обработки и эффектом ДС. Показано, что оптимальное структурное состояние, обеспечивающее высокий уровень упрочнения и повышение сопротивления разрушению, достигается в результате низкой изотермической закалки и отпуска. По данным электронной микроскопии это структурное состояние отвечает пересыщенному α -твердому раствору (мартенсит и нижний бейнит) как матричной фазе, в которой располагаются частицы δ -карбида пластинчатой морфологии при сниженном количестве остаточного аустенита. Так, комплекс механических свойств стали 65С2ВА после изотермической закалки, отпуска и ДС при 250 °C ($\sigma_{0,005} = 1180$ МПа, $\sigma_{0,02} = 1270$ МПа при $n = 9$) значительно превосходит получаемый после обычной закалки и ДС, и тем более, после стандартной термической обработки, а при использовании вместо отпуска пластической деформации значения прочностных свойств

оказываются еще более высокими: $\sigma_{0.005} = 1530$ МПа, $\sigma_{0.02} = 1670$ МПа, но при сниженном сопротивлении разрушению $n = 2$.

2. Изучена кинетика бейнитного превращения наиболее широко применяемых пружинных сталей перлитного класса 50ХФА и 65С2ВА в области температур, близкой к M_H , после предварительной аустенизации при 850–860 °С.

3. Установлено, что максимальному упрочнению и, в первую очередь, сопротивлению малым пластическим деформациям сталей 50ХФА и 65С2ВА после изотермической закалки отвечает практически предельная степень превращения переохлажденного аустенита при уменьшенном уровне дефектов кристаллического строения.

4. Установлено, что совмещение изотермической закалки с последующим отпуском позволяет достичь наиболее высокого сопротивления малым пластическим деформациям, чем после обычной закалки и отпуска, при повышенной характеристике сопротивления разрушению.

5. Определено влияние основных параметров динамического старения легированных пружинных сталей перлитного класса после изотермической закалки и установлены их оптимальные значения, обеспечивающие максимальный уровень механических свойств.

6. Разработана технология нового процесса упрочнения пружин из сталей 50ХФА и 65С2ВА, основанная на использовании изотермической закалки, отпуска и динамического старения. Процесс опробован на пружинах, используемых в конструкциях форсунок и механизма автоматического открывания борта прицепа. Показано, что этот процесс повышает эксплуатационную надежность, усталостную прочность, уменьшает осадку. Указанные процессы рекомендованы для внедрения в соответствующей отрасли.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Воробьева И.Г., Рахштадт А.Г. Динамическое старение пружинной стали 65С2ВА после изотермической закалки // Известия вузов. Машиностроение. – 1989 – № 4. – С. 90–94.

2. Воробьева И.Г., Рахштадт А.Г. Влияние режима предварительной термической обработки на механические свойства стали 65С2ВА после динамического старения // Известия вузов. Машиностроение. – 1989. – № 6. – С. 81–84.

3. Рахштадт А.Г., Воробьева И.Г. Динамическое старение пружинных сталей и сплавов // Новые стали и сплавы, режимы их термической обработки: Тез. докл. краткосрочного семинара.- Ленинград, 1989.- С. 6 - 8.

4. А. с. 1539220 СССР, МКМ⁴ с 21 D 1/78, 9/02. Способ термической обработки углеродистых пружинных сталей, легированных кремнием / А.Г.Рахштадт, И.Г.Воробьева (СССР) // Открытия, изобретения,... - 1990.- № 4.

И.В.Воробьева