

по сравнению с литым состоянием, с практически неупорядоченным расположением α -пластин (рис. 6.22, а). Однако после обработки по схеме II структура более грубая, чем после обработки по схеме I.

Механические свойства отливок сплава ВТ20Л после различной обработки приведены в табл. 6.24.

Обработка отливок сплава ВТ20Л по схемам, приведенным на рис. 6.21, приводит к повышению временного сопротивления разрыву и предела текучести на 15–20% по сравнению со свойствами в литом состоянии и после гомогенизационного отжига. При этом характеристики пластичности и ударной вязкости остаются на приемлемом уровне. В результате обработки по схемам, сочетающим ТВО и ВГО, сильнее всего повышается сопротивление усталости (рис. 6.23). Наиболее высокий предел выносливости наблюдается после гомогенизационного отжига, ВГО и ТВО с введением 0,8% Н, что обусловлено чрезвычайно мелкодисперсной структурой сплава ВТ20Л после этой обработки (см. рис. 6.22, в).

Отливки сплава ВТ6Л при обработке по первой схеме (см. рис. 6.21) после гомогенизационного отжига газостатировали при 950° С и давлении аргона 155 МПа [53]. После газостатирования отливки были подвергнуты ТВО с введением 0,8% водорода. Как

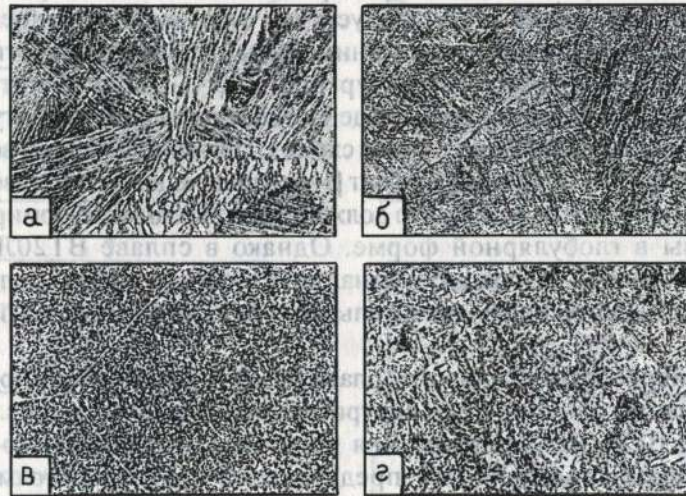


Рис. 6.22. Микроструктура сплава ВТ20Л в исходном литом состоянии (а), после гомогенизации, ВГО и наводороживания до 0,8% (б), вакуумного отжига (в), ВГО с 0,25% водорода и вакуумного отжига (г)

Таблица 6.24. Механические свойства и плотность отливок сплава ВТ20Л после различной обработки [46, 54, 140]

Режим обработки	Механические свойства						Пористость, %
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	σ_{-1} , на базе 10 ⁷ циклов, МПа	
Литое состояние (Л)	860	820	8,0	20,0	60	290	2,8
Л+гомогенизирующий отжиг (ГО)	890	850	9,0	22,0	70	—	2,8
Л+ГО+ВГО (950° С)	990	930	7,5	14,5	61	320	1,7
Л+ГО+ВГО (950° С)+ТВО (0,8% Н), схема I	1080	990	8,9	18,0	50	520	1,0
Л+НО (0,25% Н)+ВГО (900° С)+ВО (схема II)	1020	980	8,2	14,8	55	470	0,9

показано в п. 3.2, эта концентрация водорода достаточна для преобразования исходной пластинчатой литой структуры в тонкую мелкозернистую, что и было подтверждено экспериментально.

По 2-й схеме обработки газостатирование проводилось с использованием эффекта водородного пластифицирования. В сплаве ВТ6 водородное пластифицирование в наибольшей степени проявляется при температурах 800–900° С и концентрациях водорода 0,25–0,35%. Однако концентрации водорода 0,25–0,35% недостаточны для

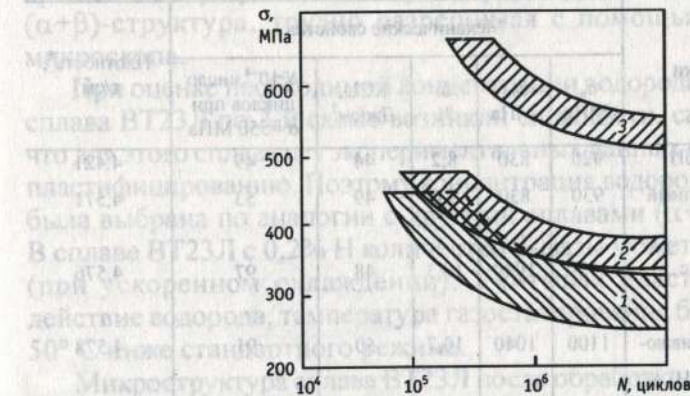


Рис. 6.23. Многоцикловая усталость сплава ВТ20Л в состояниях: 1 — исходном литом; 2 — после гомогенизационного отжига + ВГО; 3 — после гомогенизационного отжига + ВГО + ТВО. Гладкие цилиндрические образцы: схема нагружения — изгиб с вращением [54, 140]

преобразования крупнопластинчатой структуры в мелкодисперсную (см. п. 3.2). Поэтому во 2-й схеме обработки отливок из сплава ВТ6Л была выбрана концентрация водорода, равная 0,6%. При этой концентрации водорода водородное пластифицирование не получает максимального развития, но оно все же достаточно для снижения температуры ВГО на 50–70° С. После обработки по 2-й схеме микроструктура сплава ВТ6Л также представлена β-зернами с тонкой α-оторочкой и очень дисперсной α-фазой в β-матрице. Однако она отличается от аналогичной структуры после обработки по первой схеме несколько более грубым строением, что обусловлено меньшим содержанием водорода.

Обработка отливок, сочетающая ВГО и ТВО, приводит к повышению прочностных характеристик сплава ВТ6Л на 15–20%, некоторому улучшению пластичности и ударной вязкости; долговечность отливок при максимальных циклических напряжениях, равных 550 МПа, возрастает почти вдвое (табл. 6.25). Вместе с тем существенно возросла плотность отливок из-за почти полного устранения пористости. Возможно, что это явление обусловлено большими объемными эффектами, с которыми протекают фазовые превращения в сильно наводороженных титановых сплавах. Возникающие при этом большие межфазные напряжения могут

Т а б л и ц а 6.25. Механические свойства и плотность отливок сплава ВТ6Л после различной обработки [53]

Режим обработки	Механические свойства					Плотность*, г/см ³
	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	КСУ, Дж/см ²	N·10 ⁻⁴ , число циклов при σ = 550 МПа	
Литое состояние (Л)	920	830	8,2	44	49	4,421
Л+гомогенизационный отжиг (ГО)+ВГО	930	830	9,0	49	53	4,571
Л+ГО+ВГО+ТВО с 0,8 % Н (схема I)	1120	1080	10,3	48	97	4,576
Л+ГО+наводороживаю- щий отжиг (0,6 % Н) + + ВГО+вакуумный отжиг (схема II)	1100	1040	10,7	50	91	4,578

* Плотность катаного прутка из сплава ВТ6 — 4,580 г/см³.

вызывать значительную пластическую деформацию в зоне дефектов и устранять их, хотя бы частично.

Гомогенизационный отжиг отливок сплава ВТ23Л проводили при температуре 970° С, газостатирование осуществляли при температуре 900° С и давлении аргона 155 МПа в течение 2 ч, а последующее наводороживание — при 800–750° С. При обработке по 1-й схеме оптимальная концентрация водорода для сплава ВТ23 составляет 0,5% [45, 54, 140]. При меньших концентрациях водорода ТВО не обеспечивает достаточной дисперсности структуры, а при больших его содержаниях возникает опасность растрескивания образцов; к тому же возрастают длительности наводороживания и последующего вакуумного отжига.

Микроструктура сплава ВТ23Л в литом состоянии представлена крупным исходным β-зерном с тонкой α-оторочкой и пластинчатым внутризерненным строением. Гомогенизационный отжиг приводит к утолщению α-пластин и частичной их фрагментации, а также к увеличению толщины α-оторочки. Основным последствием газостатической обработки является частичное закрытие пор. При этом в микрообъемах, в которых произошло пластическое течение металла, наблюдается искривление и фрагментация пластин α-фазы, а также нарушение α-оторочки.

После ВГО и введения 0,5% Н микроструктура сплава ВТ23Л представлена практически одной β-фазой. В процессе вакуумного отжига при температуре 750° С происходит полиморфное β→α-превращение, в результате которого формируется мелкодисперсная (α+β)-структура, трудно разрешимая с помощью оптического микроскопа.

При оценке необходимой концентрации водорода при обработке сплава ВТ23Л по 2-й схеме возникли сложности, связанные с тем, что для этого сплава нет экспериментальных данных по водородному пластифицированию. Поэтому концентрация водорода, равная 0,2%, была выбрана по аналогии с другими сплавами (α+β)-класса [11]. В сплаве ВТ23Л с 0,2% Н количество β-фазы может достигать 50% (при ускоренном охлаждении). Учитывая пластифицирующее действие водорода, температура газостатирования была выбрана на 50° С ниже стандартного режима.

Микроструктура сплава ВТ23Л после обработки по схеме II была представлена исходными крупными β-зернами со слабой α-оторочкой и пластинчатым внутризерненным строением. Однако α-пластины были тоньше, чем в исходном литом сплаве, причем они были более четко ориентированы относительно друг друга, образуя крупные

Таблица 6.26. Механические свойства и пористость отливок сплава ВТ23Л после различной обработки [46, 53, 140]

Режим обработки	Механические свойства						Пористость, %
	σ_b , МПа	$\sigma_{п.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	σ_{-1} , на базе 10 ⁷ циклов, МПа	
Литое состояние (Л)	1000	960	7,2	14,0	37	320	3,7
Л+гомогенизационный отжиг (ГО)	950	900	8,0	16,9	52	300	3,7
Л+ГО+ВГО	930	880	12,0	20,5	60	280	2,3
Л+ГО+ВГО+ТВО (0,5 % Н) схема I	1190	1120	8,5	18,6	50	570	1,8
Л+ГО+НО (0,25 %Н)+ВГО+ВО (схема II)	1070	1040	9,3	19,0	59	500	1,4

хорошо сформированные α -колонии.

Механические свойства и пористость отливок сплава ВТ23Л после различной обработки приведены в табл. 6.26.

Гомогенизационный отжиг приводит к некоторому повышению характеристик пластичности и ударной вязкости и снижению прочностных характеристик, что вероятнее всего связано со снятием остаточных напряжений. ВГО вызывает дополнительное повышение удлинения, поперечного сужения и ударной вязкости в результате уменьшения пористости. Прочностные характеристики снова

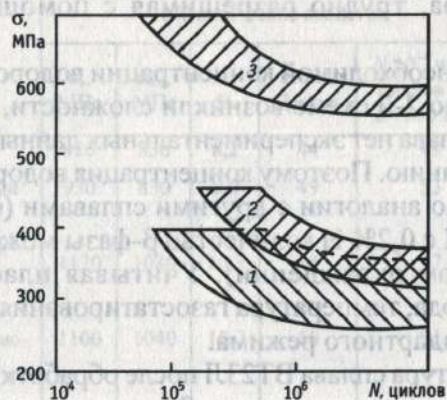


Рис. 6.24. Многоцикловая усталость сплава ВТ23Л в состояниях: 1 — исходном литом; 2 — после гомогенизационного отжига и ВГО; 3 — после гомогенизационного отжига + ВГО + ТВО. Гладкие цилиндрические образцы; схема нагружения — изгиб с вращением [54, 140]

несколько снижаются.

Обработка фасонных отливок сплава ВТ23Л по схемам I и II, включающим наводороживание, напротив, приводит к повышению прочностных характеристик, особенно сопротивления усталости (рис. 6.24) при сохранении довольно высоких показателей пластичности. Предел выносливости сплава ВТ23Л увеличился на 80 и 60%, по сравнению со свойствами литого состояния, после обработки по I и II схемам соответственно. Повышение всех прочностных характеристик и предела выносливости обусловлено кардинальным изменением микроструктуры отливок от грубой пластинчатой до тонкой пластинчатой или дисперсной глобулярной. Обработка по схеме I обеспечивает наиболее высокий уровень временного сопротивления, предела текучести и предела выносливости, так как она обеспечивает наиболее полную реализацию возможностей модифицирования структуры методами ТВО. Повышение сопротивления усталости происходит в результате увеличения числа циклов до зарождения усталостной трещины.

Предложенные схемы обработки, включающие наводороживание отливок до определенных концентраций, повышают также стабильность свойств (уменьшают их разброс) [53, 140]. Так, в частности, для исходного литого состояния число циклов до разрушения сплава ВТ23Л при напряжении 360 МПа колебалось в пределах от 10⁵ до 10⁶, а после обработки по предложенным схемам — от 75000 до 106000 циклов при напряжении 700 МПа.

Таким образом, обработка титановых отливок по схемам, которые включают в себя ТВО и ВГО, позволяет снизить температуры и давления нейтрального газа при газостатировании, уменьшить пористость, преобразовать грубую пластинчатую исходную литую структуру в тонкую пластинчатую или высокодисперсную глобулярную и, как следствие, повысить прочностные свойства и сопротивление усталости. Применение ТВО позволяет решить проблему качества и работоспособности в условиях циклического нагружения отливок из титановых сплавов и обеспечить фасонному литью конкурентоспособность с традиционными технологиями, основанными на обработке давлением и механической обработке [46, 54]. В настоящее время применение ТВО в технологии фасонного литья наиболее эффективно при изготовлении деталей небольших размеров и сложной формы. В этом случае использование ТВО экономически целесообразно, так как при фасонном литье исключается вся технологическая цепочка металлургического передела при изготовлении деформированных полуфабрикатов.

6.5.4. Водородная технология переработки и подготовки к использованию литейных отходов

Современная технология фасонного литья титановых сплавов является сложным и дорогостоящим процессом, для которого характерны низкий коэффициент использования металла (0,06–0,25), высокие безвозвратные потери дефицитного металла (10–15%), большое количество образующихся отходов (60–65% от массы шихтовых материалов) [68, 69]. Поэтому совершенствование технологии переработки и подготовки к использованию литейных отходов является актуальной проблемой.

В работе [68] предложена комплексная водородная технология переработки и использования вторичного титана. Она состоит из трех основных стадий.

1). Разделка отходов на мерные заготовки путем локального водородного охрупчивания металла по заданной траектории в специальных вакуумно-водородных установках и последующее дробление на стандартном оборудовании (чушколомах, копрах, прессах, молотах и т. п.).

2). Очистка кусковых отходов от поверхностного загрязненного слоя путем поверхностного регулируемого гидрирования отходов, отделения охрупченного слоя в галтовочных барабанах и разделения продуктов очистки.

3). Повторное использование измельченных и очищенных отходов в основном производстве путем подшихтовки металла в плавильный тигель или запрессовки в электроды. Гидрированный загрязненный титановый порошок, получаемый по предыдущей схеме (2), рекомендуется использовать в качестве материала защитных водородосодержащих покрытий (суспензий, эмульсий), наносимых на поверхность литейных форм.

Использование локального охрупчивания титана и его сплавов в методе безотходной обрубки отливок было уже описано выше. Вместе с тем даже при этом методе отделения отливок от элементов литейно-питательных систем может возникнуть необходимость дальнейшей разделки отходов на куски требуемых размеров. Эта же задача возникает и при стандартной технологии фасонного литья.

В монографии [69] описан способ разделки кусковых отходов, основанный на локальном водородном охрупчивании металла. Охрупчивание металла осуществляется высокотемпературным локальным нагревом измельчаемых отходов концентрированным источником теплоты в атмосфере водорода. Схема этого метода

представлена на рис. 6.25. Обрабатываемые отходы помещаются в вакуумно-водородную камеру, которая сначала вакуумируется до остаточного давления 0,133 Па, а затем заполняется водородом до давления выше 0,4 МПа. Избыточное давление водорода необходимо для исключения подсоса воздуха из атмосферы и образования в камере гремучей смеси. Локальный нагрев (без плавления) куска отходов 5 осуществляется электрической дугой 4, горящей между вольфрамовым электродом 3 и нагреваемым металлом. Электрод перемещают по траектории 2, соответствующей требуемой поверхности разрушения. В итоге вдоль этой траектории образуется охрупченная зона 1. Скорость перемещения электрода составляет 0,01–0,02 м/с.

Небольшая теплопроводность титана способствует локализации зоны нагрева и возникновению резких градиентов температур, что вызывает значительные термические напряжения. Наводороживание усиливает термические напряжения и, охрупчивая металл, приводит к образованию сетки мелких трещин в локально нагреваемой зоне. Повторный нагрев и охлаждение усиливают охрупчивание металла; особенно сильно это происходит, если после первого нагрева локальная наводороженная зона была охлаждена почти до нормальных температур. Ударная вязкость сплава ВТ5Л снижается в 5 раз после единичного нагрева, а после двухкратного повторения процесса сплав полностью теряет пластичность. Охрупчивание вызвано образованием гидридов, имеющих значительно больший удельный объем, чем титан.

Способ разделки кусков титановых отходов на нужные размеры путем локального их охрупчивания имеет следующие преимущества [69]:

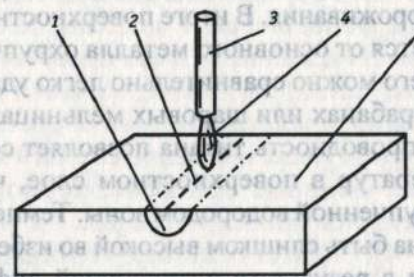


Рис. 6.25. Схема локального наводороживания (охрупчивания) литейных титановых отходов [69]

– минимально возможные энергетические затраты;
– уменьшение расхода водорода в 10–20 раз по сравнению с объемным наводороживанием;
– исключение вакуумной дегазации измельченных отходов перед последующим переплавом, так как среднее содержание водорода не превышает 0,01–0,005%, по крайней мере в объеме кусков около 60×60×20 мм;
– исключение безвозвратных потерь металла по сравнению с огневой резкой.

Некондиционные литейные отходы, составляющие 10–15% от выплавляемого металла (пятую часть от кондиционных отходов), практически не используются в технологии титановых фасонных отливок. Водородная технология позволяет вовлечь их в производство.

Тонкостенные отходы с глубиной проникновения поверхностного недопустимо загрязненного кислородом слоя более чем на половину их толщины целесообразно перерабатывать на титановый порошок методом гидрирования—дегидрирования (см. п. 6.1).

С толстостенных некондиционных отходов поверхностный загрязненный слой должен быть удален тем или иным способом. Эта задача может быть решена наводороживанием поверхностного слоя [69]. Для поверхностного наводороживания титановых отходов характерна следующая особенность. Поверхностный газонасыщенный слой титановых некондиционных отходов содержит сетку микротрещин. При наводороживании водород проникает в эти микротрещины, причем его концентрация в вершине развивающейся трещины во много раз превышает его содержание в объеме металла. В результате на границе металла с газонасыщенным слоем возникает зона с повышенным содержанием водорода. Ее ширина определяется условиями наводороживания. В итоге поверхностный газонасыщенный слой отделяется от основного металла охрупченной наводороженной зоной, и его можно сравнительно легко удалить обработкой в галтовочных барабанах или шаровых мельницах.

Низкая теплопроводность титана позволяет создавать высокие градиенты температур в поверхностном слое, что обеспечивает локализацию охрупченной водородом зоны. Температура наводороживания не должна быть слишком высокой во избежание объемного наводороживания в результате интенсивной диффузии водорода. Титановые отходы нагревают до 550–600°С в вакуумно-водородной печи с последующей их передачей из нагревательной зоны в охлаждающую, в которой отходы охлаждают до 400°С со скоростью

20–25 К/мин. При загрузке отходов на поддонах слоем толщиной не более 50–60 мм общая длительность наводороживания составляет 10–12 мин.

Гидрированный порошок, полученный из поверхностного газонасыщенного слоя, может быть использован в водородной технологии фасонного титанового литья для защитных покрытий. Очищенные отходы в количестве 30–70% от массы загрузки могут быть вовлечены в переплав без предварительной дегазации. Среднее объемное содержание водорода в очищенных отходах не превышают 0,05–0,07%, и он удаляется до безопасных концентраций при повторном переплаве металла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема, связанная с исследованием водородосодержащих систем, сложна и многогранна [55]. Она концентрирует в себе различные фундаментальные и прикладные аспекты: от использования водорода и его изотопов в качестве источника плазмы в термоядерном синтезе или экологически чистого топлива до разработки методов борьбы с водородным охрупчиванием материалов и конструкций. Не менее многогранна проблема взаимодействия водорода с металлическими материалами [78–84]. В настоящей монографии обсуждены только некоторые аспекты этой проблемы, получившие решение в многочисленных трудах ученых МАТИ нескольких поколений и сложившиеся в новое научное направление в материаловедении «Водородные технологии металлических материалов».

Традиционно проблема взаимодействия водорода с металлическими материалами рассматривалась в контексте борьбы с водородным охрупчиванием конструкционных материалов в процессе эксплуатации [1–4, 71, 85]. В этом отношении водород всегда рассматривался как *вредная примесь* в металлах и сплавах, увеличение содержания которой выше некоторой критической концентрации приводит к преждевременному разрушению изделий. Поэтому длительное время усилия многих ученых и научных центров как в России, так и за рубежом были направлены на исследование природы водородной хрупкости и разработки методов борьбы с водородным охрупчиванием конструкционных материалов [1–4, 71, 85].

Водородная хрупкость конструкционных металлических материалов может быть обусловлена как водородом, находящимся в твердом растворе металлической матрицы, так и выделением в структуре гидридов. Последние обычно присутствуют в структуре сплавов на основе металлов, экзотермически абсорбирующих водород. Типичными представителями этого класса являются металлы IV и V групп, а также палладий. Схематические диаграммы состояния металл–водород при атмосферном давлении для перечисленных металлов приведены на рис. 1 и подробно описаны в монографиях [1–4]. Следует отметить, что образование гидридов (γ -фаза) в сплавах рассматриваемых систем происходит при относительно невысоких температурах. Поэтому особенно интенсивно развитие водородной хрупкости, обусловленной гидридными выделениями, имеет место при температурах, близких

к нормальной (комнатной) или при криогенных температурах [1–4, 71, 85].

Методы борьбы с водородным охрупчиванием достаточно многообразны и во многом определяются положением источника наводороживания в общей цепочке получения изделия и его эксплуатации (см. рис. 1). Если наводороживание происходит на технологической стадии получения и обработки изделия, то наиболее эффективным способом предотвращения водородной хрупкости при последующей эксплуатации является вакуумный отжиг готового изделия [71, 85]. При наличии источника наводороживания в условиях эксплуатации применяют различные водородонепроницаемые покрытия, оптимизируют химический состав сплава и некоторые другие способы. Возможно применение и комбинированных методов.

В описанных выше процессах водород является вредной примесью. Однако это лишь одна из сторон, причем негативная, многогранной проблемы взаимодействия водорода с металлическими материалами. Она может иметь и позитивные стороны, которым довольно длительное время не уделяли должного внимания. В

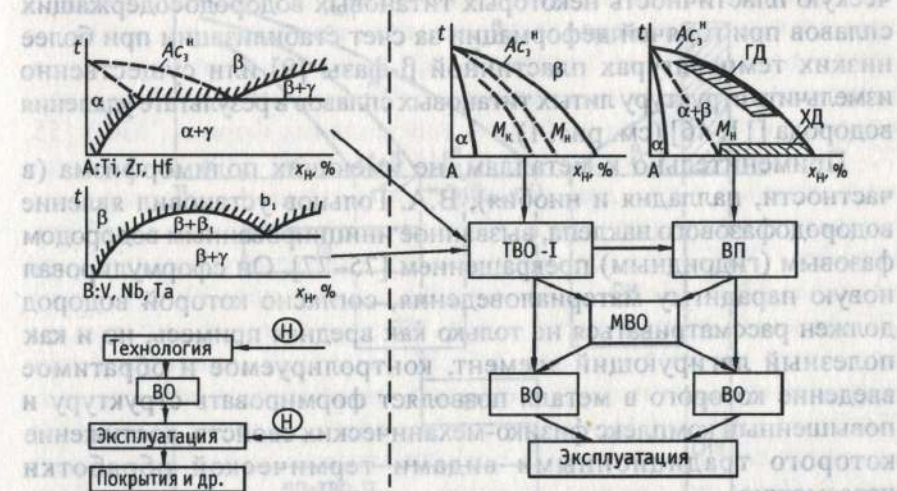


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая роль водорода на технологической стадии получения и обработки изделий при взаимодействии с конструкционными материалами при эксплуатации: ГД — горячая деформация; ВП — водородное пластифицирование; ВО — вакуумный отжиг; ТВО — термоводородная обработка; МВО — механоводородная обработка; $A_{c_3}^H$ — температура полиморфного превращения наводороженного металла; ХД — холодная деформация

частности, водород может быть использован как полезный легирующий элемент для создания новых водородосодержащих материалов [46, 55] или принципиально новых технологических процессов обработки традиционных конструкционных материалов, обеспечивающих им качественно новый уровень технологических и эксплуатационных свойств [46–55]. Технологию, использующую водород как активный агент для повышения эффективности технологических операций, называют водородной технологией. Особенно активно развивается водородная технология сплавов на основе титана как конструкционных материалов, широко применяемых в различных областях практической деятельности и в то же время активно взаимодействующих с водородом [11, 15, 20, 45–54].

Водород — единственный элемент, который достаточно легко и в больших количествах поглощается материалами на основе гидридообразующих элементов и также легко удаляется из них при термической обработке в вакууме [19, 26, 55]. Это позволяет использовать водород как временный легирующий элемент в металлических материалах на определенной стадии производства полуфабрикатов и изделий, в частности, из конструктивных титановых сплавов [11, 15, 46]. При этом удается повысить технологическую пластичность некоторых титановых водородосодержащих сплавов при горячей деформации за счет стабилизации при более низких температурах пластичной β -фазы [9] или существенно измельчить структуру литых титановых сплавов в результате удаления водорода [11, 46] (см. рис. 1).

Применительно к металлам, не имеющих полиморфизма (в частности, палладия и ниобия), В.А. Гольцов установил явление водородофазового наклепа, вызванное инициированным водородом фазовым (гидридным) превращением [75–77]. Он сформулировал новую парадигму материаловедения, согласно которой водород должен рассматриваться не только как вредная примесь, но и как полезный легирующий элемент, контролируемое и обратимое введение которого в металл позволяет формировать структуру и повышенный комплекс физико-механических свойств, достижение которого традиционными видами термической обработки невозможно.

А.А. Ильин ввел понятие о термоводородной обработке (ТВО), которая представляет собой термическое воздействие на материал, совмещенное с обратимым легированием водородом [39]. В основе ТВО лежит возможность управлять механизмом и кинетикой существующих или индуцированных водородом новых фазовых и

структурных превращений путем рационального подбора температурно-концентрационных условий воздействия на материал (см. рис. 1). В работах [45–47] было показано, что именно ТВО является основой всех благоприятных эффектов (пластифицирование при горячей деформации [11, 15], улучшение компактирования порошковых материалов и механической обработки [54, 63–67] и т. д.), связанных с использованием водорода как временного легирующего элемента титановых сплавов. В такой технологической схеме окончательной операцией является вакуумный отжиг (ВО), который обеспечивает не только удаление водорода до безопасных для эксплуатации конструкционных материалов концентраций, но и обеспечивает получение оптимальной структуры (см. рис. 1).

В период интенсивного поиска путей развития водородной энергетики [84, 112] и водородной технологии металлических материалов достаточно остро встает вопрос об источниках или аккумуляторах водорода. В контексте обсуждаемой проблемы такими источниками водорода могут служить гидриды металлов [212] (рис. 2). Однако гидриды металлов как источники водорода имеют

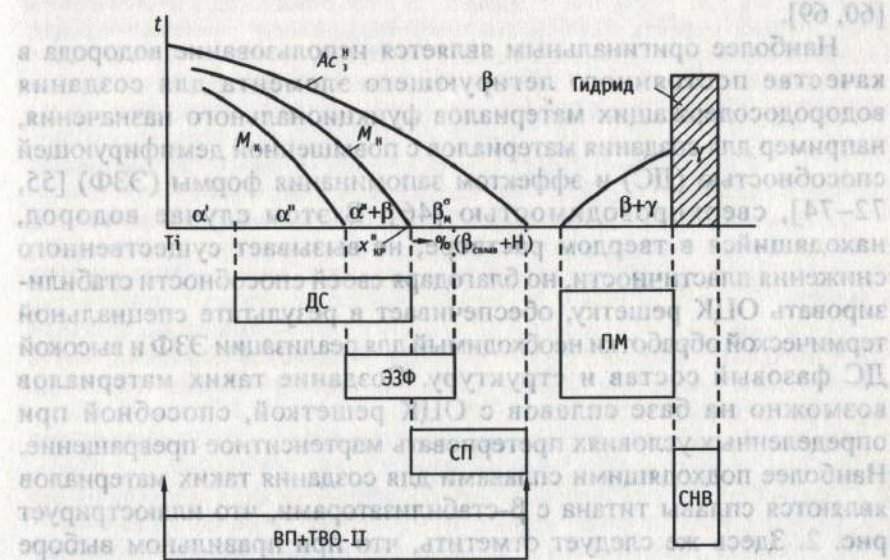


Рис. 2. Схема использования водорода в качестве постоянного легирующего элемента для создания материалов функционального назначения [55]: СНВ — сплавы-накопители водорода; ПМ — порошковые материалы; ДС — материалы с высокой демпфирующей способностью; ЭЗФ — материалы с эффектом запоминания формы; СП — сверхпроводники

недостаточно высокий коэффициент полезного действия и нестабильны при многократном использовании. Поэтому в последние годы интенсивно ведется поиск оптимальных составов сплавов-накопителей водорода. Наиболее перспективными и относительно дешевыми считают сплавы на основе интерметаллидов, и, в частности, на основе интерметаллида TiFe. Таким образом, водород может использоваться как постоянный легирующий элемент для создания материалов функционального назначения.

Однако использование водорода как постоянного легирующего элемента, не ограничивается только созданием материалов — аккумуляторов водорода. Возможно создание водородосодержащих материалов другого функционального назначения. При этом может использоваться как эффект охрупчивания металлов и сплавов под действием абсорбированного водорода, так и эффект водородного пластифицирования, проявляющийся при сохранении водорода в твердом растворе (см. рис. 2). Примером использования охрупчивающего действия водорода является создание порошковых водородосодержащих материалов для защиты от загрязнения примесями поверхности фасонных отливок из титановых сплавов [60, 69].

Наиболее оригинальным является использование водорода в качестве постоянного легирующего элемента для создания водородосодержащих материалов функционального назначения, например для создания материалов с повышенной демпфирующей способностью (ДС) и эффектом запоминания формы (ЭЗФ) [55, 72–74], сверхпроводимостью [46]. В этом случае водород, находящийся в твердом растворе, не вызывает существенного снижения пластичности, но благодаря своей способности стабилизировать ОЦК решетку, обеспечивает в результате специальной термической обработки необходимый для реализации ЭЗФ и высокой ДС фазовый состав и структуру. Создание таких материалов возможно на базе сплавов с ОЦК решеткой, способной при определенных условиях претерпевать мартенситное превращение. Наиболее подходящими сплавами для создания таких материалов являются сплавы титана с β -стабилизаторами, что иллюстрирует рис. 2. Здесь же следует отметить, что при правильном выборе концентрации водорода для дополнительного легирования металлической основы и применении специальных видов термической обработки можно не только обеспечить необходимый фазовый состав и структуру водородосодержащих материалов функционального назначения, но и существенно повысить их технологическую

пластичность даже при холодной деформации. При этом в технологическую схему обработки таких материалов наряду с водородным пластифицированием входит ТВО-II, которая в отличие от ТВО-I не предполагает проведение вакуумного отжига как окончательной операции [46, 55].

Таким образом, усилиями нескольких поколений ученых МАТИ в науке о материалах и технологии их обработки сформировано новое научное направление: водородная технология получения и обработки металлических материалов, использование которой в производстве открывает перспективы как создания новых конструкционных и функциональных материалов, так и повышения эффективности производства полуфабрикатов и изделий из традиционных металлов и сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ливанов В.А., Буханова А.А., Колачев Б.А. Водород в титане. – М.: Металлургия, 1962. – 246 с.
2. Колачев Б.А. Водородная хрупкость цветных металлов. – М.: Металлургия, 1966. – 256 с.
3. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
4. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 544 с.
5. Zwicker U., Schleicher H. Titanium Alloys Deformability Improvement Technique during Hot Pressure Shaping. USA patent № 2892742, grade 148-11.5; 1959.
6. Колачев Б.А., Носов В.К., Ливанов В.А. и др. Влияние водорода на технологическую пластичность сплава Ti-9% Al // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1972, № 4, с. 137–142.
7. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Носов В.К. и др. Оценка благоприятного влияния водорода на деформируемость титанового сплава СТ4 // Кузнечно-штамповочное производство, 1975, № 1, с. 29–32.
8. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Носов В.К. Влияние водорода на деформируемость титановых сплавов разного фазового состава // Титан. Металловедение и технология: Тр. III-й Межд. конф. по титану. – М.: ВИЛС, 1976, т. 3, с. 61–68.
9. Колачев Б.А., Носов В.К., Нартова Т.Т. и др. Возможности практического использования эффекта водородного пластифицирования титановых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство, 1978, № 6, с. 11–13.
10. Kolachev B.A., Nosov V.K. Hydrogen Plasticization in Hot Deforming of Titanium Alloys // Titanium Science and Technology. Proc. 5th Intern. Conf. Munich, 1984, p. 625–632.
11. Носов В.К., Колачев Б.А. Водородное пластифицирование при горячей деформации титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 118 с.
12. Lyin A.A., Nosov V.K., Sevortsova S.I. Hydrogen Technology of Semiproducts and Finished Goods Production from High-Strength Titanium Alloys // Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing. TMS. Anaheim, California, 1997, p. 517–523.
13. Овчинников А.В., Мамонов А.М., Чугунова В.М. Эксплуатационные характеристики изделий из сплава BT25У, полученных по водородной технологии // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. 1-я Межд. конф. по титану стран СНГ. – М.: ВИЛС, 1994, с. 492–499.
14. Водородное пластифицирование и термоводородная обработка при получении полуфабрикатов из сплавов на основе Ti₂Al / В.К. Носов, А.А. Ильин, В.Н. Уваров и др. // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. 1-я Межд. конф. по титану стран СНГ. – М.: ВИЛС, 1994, т. 2, с. 668–674.
15. Носов В.К., Овчинников А.В., Мамонов С.А. Научные основы, условия проявления и область применения водородного пластифицирования титановых сплавов // Науч. тр. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, 1998, вып. 1 (73), с. 57–62.
16. Колачев Б.А., Вигдорчик С.А., Мальков А.В., Носов В.К. О благоприятном влиянии водорода на технологическую пластичность титановых сплавов // ТЛС, 1974, № 7, с. 32–35.
17. Колачев Б.А., Мальков А.В., Низкин И.Д. и др. О возможности снижения температуры горячей высадки болтов путем обратимого легирования водородом // Изв. АН СССР. Металлы, 1991, № 3, с. 67–70.
18. Носов В.К., Коллеров М.Ю., Мамонов С.А. и др. Влияние водорода на деформируемость титановых сплавов BT22 и BT22И при нормальной температуре // Металлы, 1995, № 6, с. 95–99.
19. Колачев Б.А. Обратимое легирование титановых сплавов водородом // Митом, 1993, № 10, с. 28–32.
20. Колачев Б.А., Талалаев В.Д. Водородная технология титановых сплавов // Титан, 1993, № 1, с. 43–46.
21. Колачев Б.А., Носов В.К. Водородное пластифицирование и сверхпластичность титановых сплавов // ФММ, 1984, т. 57, вып. 2, с. 288–297.
22. Lederich R.I., Sastry S.M.L., O'Neal I.E. and Kerr W.R. Advanced Processing Methods for Titanium. TMS-AIME, Warrendale, PA, 1982, p.115.
23. Lederich R.I., S.M.L. Sastry, I.E. O'Neal. Microstructural Refinements for Superplastic Forming Optimization in Titanium Alloys // Titanium Sci. and Technol., Proc. 5th Intern. Conf. on Titanium. Munich, 1984, v. 2, pp. 695–702.
24. Zhao L.K., Zhang S.Q., Yan M.G. Improvement in the superplasticity of Ti-6Al-4V alloy by hydrogenation // Superplasticity and Superplastic Forming. Proc. Intern. Conf. TMS, Blaine, Washington, 1988, p. 459–464.
25. Shaoging Zhang, Linruo Zhao. Effect of Hydrogen on Superplasticity and Microstructure of Ti-6Al-4V Alloy // J. Alloys and Compounds, 1995, 212, № 2, p. 233–236.
26. Колачев Б.А. Водород в металлах и сплавах // Митом, 1999, № 3, с. 3–11.
27. Sirina J.V., Fedotov I.L., Portnoy V.K. e.a. Effect of hydrogen on superplasticity of titanium alloys // Materials Science Forum, 1995, v. 170, p. 299–304.
28. Портной В.К., Новиков И.И., Ильин А.А. и др. Влияние водорода на сверхпластичность листов из сплава BT6 // Металлы (РАН), 1995, № 6, с. 89–94.
29. Понятовский Е.Г., Башкин И.О., Сеньков О.Н., Малышев В.Ю. Влияние температуры, скорости деформации и концентрации водорода на эффект водородного пластифицирования титанового сплава BT20 // ДАН СССР, 1989, т. 306, № 3, с. 613–616.
30. Понятовский Е.Г., Сеньков О.Н., Башкин И.О. Влияние исходной структуры на эффект водородного пластифицирования сплава BT20 // Металлофизика, 1990, т. 12, № 5, с. 20–25.
31. Башкин И.О., Понятовский Е.Г. Водородное пластифицирование в сплавах титана // Материаловедение, 1997, № 2, с. 35–41.
32. Колачев Б.А., Носов В.К., Лебедев И.М. Обратимое водородное легирование титановых сплавов // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1985, № 3, с. 104–110.
33. Kerr W.R., Smith M.E., Rosenblum F.G. e.a. Hydrogen as an Alloying Element in Titanium (Hydrovac) // Titanium 80: Science and Technol., Proc. 4th Intern. Conf. on Titanium, 1980, Kyoto, p. 2477–2486.
34. Eylon D., Froes F.H., Barice W.J. Effect of Treatments on Mechanical Properties of Titanium Alloy Castings // 2nd Intern. SAMPE Metals and Metals Process. Conf., Dayton, 1988, v. 2, pp. 28–36.
35. Yolton C.F., Eylon D., Froes F.H. Microstructural Modification of Titanium Alloys Products by Temporary Alloying with Hydrogen // Sixth World Conference on Titanium. Cannes, France, 1988, p. 1641–1647.
36. Eylon D., Froes F.H., Barice W.J. Effects of Treatment on Mechanical Properties

- of Titanium Alloy Casting // Sample quarterly, Jan. (1989), p. 42–45.
37. Zhang Shaoging, Pan Feng. Hydrogen treatment of cast Ti–6Al–4V alloy // Chin J. Met. Sci. Technol., 1990, v. 6, p. 187–192.
38. Сэн Тохан. Улучшение механических свойств прецизионного литья из сплавов Ti путем гидрирования // Metals and Technology, 1989, v. 59, № 5, с. 18–21.
39. Ильин А.А. Фазовые и структурные превращения в титановых сплавах, легированных водородом // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1987, № 1, с. 96–101.
40. Ильин А.А., Колачев Б.А. О термоводородной обработке титановых сплавов // Термическая, химико-термическая и лазерная обработка сталей и титановых сплавов: Сб. науч. тр. / ППИ. – Пермь, 1989, с. 97–101.
41. Колачев Б.А., Ильин А.А., Мамонов А.М. Термоводородная обработка титановых сплавов // Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов: Сб. науч. тр. – М.: ВИЛС, 1991, с. 132–142.
42. Ильин А.А., Мамонов А.М., Засыпкин В.В. и др. Термоводородная обработка литых α - и псевдо- α -титановых сплавов // ТЛС, 1991, № 2, с. 31–38.
43. Ильин А.А., Колачев Б.А., Михайлов Ю.В. Термоводородная обработка титановых сплавов разных классов // Металловедение и технология цветных металлов: Сб. науч. тр. – М.: Наука, 1992, с. 92–98.
44. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Mamonov A.M. Phase and structure transformations in titanium alloys under thermohydrogen treatment // Titanium 92; Science and Technology. TMS. San Diego, California, 1993, p. 941–948.
45. Ильин А.А., Мамонов А.М., Носов В.К. Научные основы, технология и перспективы применения термоводородной обработки титановых сплавов // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. I-я Межд. научно-техн. конф. стран СНГ по титану. – М.: ВИЛС, т. 1, 1994, с. 500–527.
46. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. – М.: Наука, 1994. – 304 с.
47. Ильин А.А., Мамонов А.М., Коллеров М.Ю. Научные основы и принципы построения технологических процессов термоводородной обработки титановых сплавов // Металлы (РАН), 1994, № 4, с. 157–168.
48. Ilyin A.A., Mamonov A.M., Nosov V.K. Thermohydrogen treatment: scientific basics and future application // Proc. 2nd Pasific Rim. Intern. Conf. on Advaced Materials and Processing. Korea, 1995, p. 697–705.
49. Mamonov A.M., Ilyin A.A., Budrik B.B. The thermohydrogen treatment of high temperature titanium alloys with intermetallic strengthening // Proc. 2nd Pacific Rim Intern. Conf. on Advanced Materials and Processing. Korea, 1995, p. 2427–2432.
50. Ilyin A.A., Polkin I.S., Mamonov A.M., Nosov V.K. Thermohydrogen treatment – base of hydrogen treatment of titanium alloys // Proc. Eighth World Conference on «Titanium-95», Birmingham, UK, 1995, p. 2462–2469.
51. Bratuhin A.G., Ilyin A.A., Polkin I.S. e. a. Treatment of weldments construction from titanium alloys by hydrogen technology // Proc. Eighth World Conference in «Titanium-95». Birmingham, UK, 1995, p. 880–886.
52. Kolachev B.A., Ilyin A.A., Nosov V.K. Hydrogen Technology as New Perspective Type of Titanium Alloy Processing // Advances in Science and Technology of Titanium Alloy Processing. TMS, Anaheim California, USA, 1996, p. 331–338.
53. Ilyin A.A., Mamonov A.M., Kusakina Y.N. Thermohydrogen treatment of shape casted titanium alloys // Advances in the science and technology of titanium processing. TMS. Anaheim, California, 1997, p. 639–646.
54. Ильин А.А., Мамочов А.М., Коллеров М.Ю. Термоводородная обработка –

новый вид обработки титановых сплавов // Перспективные материалы, 1997, № 1, с. 5–14.

55. Ильин А.А. Явление обратимого легирования водородом и водородные технологии металлических материалов // Науч. тр. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, 1998, вып. 1 (73), с. 38–43.
56. Levin L., Vogt R.G., Eylon D., Froes F.H. Fatigue Resistance Improvement of Ti–6Al–4V by Thermochemical Treatment // Titanium Sci. and Technol. Proc 5th Intern. Conf. Munich. Oberursel. 1985, v. 4, с. 2107–2114.
57. Stinson J., Vogt R.G., Eylon D., Froes F.H. Improvement of HCF Properties in Ti–6Al–4V Castings Via Thermochemical Treatment // High Integrity Castings. ASM, 1988, p. 3–8.
58. Froes F.H., Eylon D. Thermochemical Processing (TCP) of Titanium. Alloys by Temporary Alloying with Hydrogen // Hydrogen Effect on Materials Behaviour. TMS Warrendale P.A. 1990, p. 261–283.
59. Vogt R.G., Froes F.H., Eylon D. Thermo-chemical Treatment (TCT) of Titanium Alloys Net Shapes // Titanium Net Shape Technologies. Warrendale, Pa, 1984, p. 145–154.
60. Порошковая металлургия титановых сплавов. Под ред. Ф.Х. Фроус и Дж.Е. Смугерески. Пер. с англ. Под ред. С.Г. Глазунова. – М.: Металлургия, 1985. – 263 с.
61. Колачев Б.А., Шевченко В.В., Талалаев В.Д., Низкин И.Д. Водородная технология производства пресс-изделий из титановой стружки без ее переплава // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. I-я Межд. конф. стран СНГ по титану. – М.: ВИЛС, 1994, т. 1, с. 283–290.
62. Колачев Б.А., Шевченко В.В., Низкин И.Д., Дроздов П.Д. Теоретическое обоснование водородной технологии производства пресс-изделий из титановых отходов без их переплавки // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1997, № 4, с. 60–65.
63. Колачев Б.А., Талалаев В.Д., Егорова Ю.Б. и др. О природе благоприятного влияния водорода на обрабатываемость титановых сплавов резанием // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. – М.: ВИЛС, 1994, т. 2, с. 873–882.
64. Kolachev B.A., Egorova Y.B., Talalaev V.D. Machinohydrogen Treatment of Titanium Alloys // Titanium'95. Sci. and Techn. Proc. 8 Word Conf. on Titanium. Birmingham. 1995. London, 1996, v. 1, p. 782–789.
65. Kolachev B.A., Egorova Y.B., Talalaev V.D. Hydrogen Influence on Machining of Titanium Alloys // Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing. Proc. Intern. Symp. TMS., Anaheim, USA, 1996, p. 339–346.
66. Колачев Б.А., Ильин А.А., Егорова Ю.Б. Основные принципы механоводородной обработки титановых сплавов // Науч. тр. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. – М.: ЛАТМЭС, 1998, вып. 1 (73), с. 43–48.
67. Ильин А.А., Егорова Ю.Б., Мамонов А.М. Исследование возможности применения термоводородной обработки для улучшения обрабатываемости резанием сплава BT23 // Науч. тр. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. – М.: ЛАТМЭС, 1998, вып. 1 (73), с. 27–31.
68. Надежин А.М., Бибииков Е.Л. Комплексный производственный процесс получения высококачественных литых изделий из титановых сплавов на основе водородной технологии // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. I-я Межд. конф. стран СНГ по титану. – М.: ВИЛС, 1994, т. 1, с. 263–272.
69. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / А.Г. Братухин, Е.Л. Бибииков, С.Г. Глазунов и др. – М.: ВИЛС, 1998. – 292 с.

70. Yang Ke, Zhon Chaohui, Li Dongfa. Пластичность при повышенных температурах титановых сплавов и изготовление композиционных материалов на основе титана с применением наводороживания // *Rare Metal Mater. and Eng.*, 1997, v. 26, № 1, p. 11–18.

71. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.

72. Коллеров М.Ю., Ильин А.А., Шинаев А.В. Влияние водорода на неупругие свойства сплавов на основе титана // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. 1-я Межд. конф. стран СНГ по титану. – М.: ВИЛС, т. 1, с. 477–486.

73. Коллеров М.Ю., Ильин А.А., Скворцова С.В. Мартенситные превращения с эффектом неупругого поведения в водородосодержащих титановых сплавах // *Металлы (РАН)*, 1994, № 5, с. 118–125.

74. Ilyin A.A., Kollerov M. Yu., Mamonov A.M. e.a. Hydrogen influence on martensitic transformation and shape memory effect in titanium alloys // *J. de Physique III*. 1995, v. 5, p. 1145–1150.

75. Гольцов В.А., Тимофеев Н.И., Мачикина И.Ю. Явление фазового наклепа в гидридообразующих металлах и сплавах // *ДАН СССР*, 1977, т. 235, с. 1060–1063.

76. Гольцов В.А. Водородно-фазовый наклеп и водородная обработка. – В кн.: Атомно-водородная энергетика и технология. – М.: Атомиздат, 1978, вып. 1. с. 193–230.

77. Goltsov V.A. The phenomenon of controllable hydrogen phase naklep and the properties for its use in metal science and engineering: A new paradigm of metal science // *Proc. Intern Symp. Metal-hydrogen System*. Miami Beach. Oxford etc. Pergamon press. 1982, p. 211–223.

78. Водородная обработка материалов: Сб. информ. материалов 1-й Межд. конф. ВОМ-95. – Донецк, 1995, ч. 1, 124 с., ч. 2, 83 с.

79. Водородная обработка материалов: Сб. информ. материалов Межд. конф. ВОМ-98. – Донецк, 1998. – 235 с.

80. Водород в металлических материалах: Тезисы докл. Всероссийского семинара. – М.: МГАТУ, 1993. – 55 с.

81. Водород в металлических материалах: Матер. 2-го Российского научно-техн. семинара. – М.: МГАТУ, 1994. – 55 с.

82. Goltsov V.A. Fundamentals of Hydrogen Treatment of Materials and its Classification // *Intern. J. Hydrogen Energy*, 1997, v. 22, № 2/3, p. 119–124.

83. Гольдсмит Х. Дж. Сплавы внедрения. Т. 2. – М.: Мир, 1971. – 464 с.

84. Колачев Б.А., Ильин А.А., Лавренко В.А., Левинский Ю.В. Гидридные системы. – М.: Металлургия, 1992. – 352 с.

85. Б.А. Колачев, В.В. Садков, В.Д. Талалаев, А.В. Фишгойт. Вакуумный отжиг титановых конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.

86. Massalski T.V. Binary Alloy Phase Diagrams. ASM. Metals. Ohio, 1986, 1987; v. 1, 2. – 2224 p.

87. San-Martin, Manchester F.D. The H–Ti System // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1987, v. 8, № 1, p. 30–42.

88. Термодинамический анализ системы титан–водород / Р.М. Габидуллин, Б.А. Колачев, А.А. Буханова и др. // *Титан. Металловедение и технология*: Тр. III-й Межд. конф. по титану. – М.: ВИЛС, 1978, с. 419–427.

89. Kivilahti J.K., Miettinen J.M. A thermodynamic analysis of the Ti–H system // *CALPHAD*, 1987, v. 11, № 2, p. 187–199.

90. Агеев Н.В., Бабарэко А.А., Рубина Е.Б., Бецофен С.Я. и др. Рентгенографическое исследование гидридов титана в промышленных сплавах титана // *МиТОМ*, 1976, № 2, с. 19–27.

91. Numakura H., Koiwa M. Hydride precipitation in titanium // *Acta metal*, 1984, v. 32, № 10, p. 1799–1807.

92. Плавка и литье титановых сплавов / А.А. Андреев, Н.Ф. Аношкин, Г.А. Бочвар и др. – М.: Металлургия, 1994. – 368 с.

93. Буханова А.А., Колачев Б.А. О диаграмме состояния системы титан–алюминий–водород в интервале 500–800° С // *Фазовые равновесия в металлических сплавах*: Сб. науч. тр. – М., 1981, с. 127–131.

94. Boyd J.D. Deformation-assisted Nucleation of Titanium Hydride in an Alpha-Beta Titanium Alloy // *The Science, Technology and Application of Titanium*. Pergamon Press. Oxford e.a. 1970, p. 545–556.

95. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Водородное охрупчивание сплавов титана с алюминием // *Вопросы металлостроения*: Тр. МАТИ, 1961, вып. 50, с. 93–102.

96. Paton W.E., Hickman B.S., Leslie D.H. Behavior of hydrogen in α -phase Ti–Al alloys // *Met. Trans.*, 1974, v. 2, № 10, p. 2791–2796.

97. Колачев Б.А., Габидуллин Р.М., Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1992. – 272 с.

98. Rudman P.S., Reilly I.I., Waswall R.H. Hydrogen absorption in Ti–Al // *Berichte Bunsel-Gessell. Phys. Chem.* 1972, bd. 81, № 1, p. 76–80.

99. Chu Wu-Yang, Thompson A.W., Williams J.C. Hydrogen solubility in a titanium aluminide alloy // *Acta metal. et mater.*, 1992, v. 40, № 3, с. 455–462.

100. Schwartz D.S., Yelon W.B., Berliner R.R. e.a. A novel hydride phase in hydrogen charged Ti₃Al // *Acta metal. et mater*, 1991, v. 39, № 11, с. 2799–2803.

101. Nourbakhsh S., Margolin H., Levy K. e.a. Precipitation behavior in Ti–25Al–H₂ alloys // *Scr. met. of mater*, 1994, v. 30, № 2, с. 209–212.

102. Gao Ming, Boodey J.Bart, Wei Robert P. Hydrides in thermally charged alpha-2 titanium aluminides // *Scr. met. et mater*, 1990, v. 24, № 1, с. 2135–2138.

103. Константы взаимодействия металлов с газами / Я.Д. Коган, Б.А. Колачев, Ю.В. Левинский и др. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.

104. Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. – М.: ИЛ, 1948. – 376 с.

105. Фромм Е., Гебхардт Е. Газы и углерод в металлах. – М.: Металлургия, 1980. – 711 с.

106. Егорова Ю.Б., Вилков В.И., Белова С.Б. О режимах наводороживания титановых сплавов в водородной технологии металлов // *Изв. вузов. Цветная металлургия*, 2001, № 1, с. 40–44.

107. Карслоу Г., Эгер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

108. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

109. Габидуллин Э.Р., Носов В.К., Ильин А.А. Кинетические параметры взаимодействия водорода с титаном // *Металлы (РАН)*, 1995, № 6, с. 71–75.

110. Колачев Б.А., Егорова Ю.Б., Седов В.И. и др. Обоснование режимов наводороживания титановых сплавов для улучшения их обрабатываемости резанием // *Изв. вузов. Цветная металлургия*, 1991, № 2, с. 90–94.

111. Колачев Б.А., Полькин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. – М.: ВИЛС, 2000. – 318 с.

112. Колачев Б.А., Шалин Р.Е., Ильин А.А. Сплавы-накопители водорода. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
113. Колачев Б.А., Мамонова Ф.С., Седов В.И., Мальков А.В. Влияние водорода на фазовый состав титановых сплавов // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1982, № 1, с. 86–91.
114. Ильин А.А., Мамонов А.М. Температурно-концентрационные диаграммы фазового состава водородосодержащих многокомпонентных сплавов на основе титана // Металлы (РАН), 1994, № 5, с. 71–78.
115. Ильин А.А., Мамонов А.М. Фазовые равновесия в водородосодержащих многокомпонентных системах на основе титана // Титан, 1993, № 3, с. 12–16.
116. Ilyin A.A., Matonov A.M. Thermohydrogen treatment of casted titanium alloys // J. Aeronaut. Mater., 1992, v. 2, p. 4–5.
117. Белова С.Б., Носов В.К., Ильин А.А. Условия проявления эффекта водородного пластифицирования в α -титановом сплаве BT5-1 // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1987, № 5, с. 83–86.
118. Ильин А.А., Мамонов А.М., Петров В.А. Закономерности формирования фазового состава и структуры в титановых сплавах BT23 и BT20, легированных водородом, при термической обработке // Науч. тр. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. – М.: ЛАТМЭС, 1998, вып. 2 (74), с. 31–35.
119. Ильин А.А., Мамонов А.М. Фазовые превращения и механизм структурообразования в титановых сплавах, легированных водородом // Водород в металлических материалах: Сб. науч. тр. – М.: МАТИ, 1993, с. 3–5.
120. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСиС, 1999. – 416 с.
121. Колачев Б.А., Ильин А.А., Володин В.А., Рынденков Д.В. Структурная диаграмма титановых сплавов в координатах эквивалент молибдена–эквивалент алюминия // Металлы (РАН), 1997, № 1, с. 136–145.
122. Мамонов А.М., Ильин А.А., Овчинников А.В. Влияние водорода на фазовый состав и структуру жаропрочного титанового сплава BT25Y // Металлы (РАН), № 6, с. 46–51.
123. Овчинников А.В., Носов В.К. Водородное пластифицирование титановых сплавов BT20 и BT25Y в интервале температур 350–700°C // Водородная обработка материалов: Сб. статей. – Донецк, 1998, с. 103.
124. Ilyin A.A., Matonov A.M., Kusakina Y.N., Nosov V.K. Hydrogen influence on the structure of high-temperature strength titanium alloy with intermetallic hardening // EUROMAT-97, Maastricht – NL, April 1997. Proc. 5th European conference on advanced materials, processes and applications. 1997, p. 307–310.
125. Мамонов А.М., Кусакина Ю.Н., Ильин А.А. Закономерности формирования фазового состава и структуры в жаропрочном титановом сплаве с интерметаллидным упрочнением при легировании водородом // Металлы (РАН), 1999, № 3, с. 84–87.
126. Попов А.А., Ильин А.А., Коллеров М.Ю. и др. Влияние водорода на фазовый состав и структуру закаленных сплавов системы Ti–Nb // Металлы (РАН), 1994, № 5, с. 109–117.
127. Попов А.А., Ильин А.А., Демаков С.А. и др. О природе X-фазы в сплавах Ti–Nb–H // Металлы (РАН), 1995, № 6, с. 52–58.
128. Ильин А.А., Коллеров М.Ю., Осинцева Н.О. Влияние водорода на структуру закаленных сплавов Ti-изоморфный β -стабилизатор // Науч. тр. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. – М.: ЛАТМЭС, 2000, вып. 3 (75), с. 27–31.
129. Ильин А.А., Михайлов Ю.В., Носов В.К., Майстров В.М. Влияние водорода на распределение легирующих элементов между α - и β -фазами в титановом сплаве BT23 // ФХММ, 1987, № 1, с. 112–114.
130. Ильин А.А., Мамонов А.М. Высокотемпературные рентгеновские исследования водородосодержащего сплава BT18Y // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1989, № 2, с. 88–93.
131. Палькин И.С., Колачев Б.А., Ильин А.А. Аллюминиды титана и сплавы на их основе // ТЛС, 1997, № 3, с. 32–39.
132. Белов С.П., Ильин А.А., Мамонов А.М., Александрова А.В. Теоретический анализ процессов упорядочения в сплаве на основе Ti₃Al. Влияние водорода на устойчивость интерметаллида Ti₃Al // Металлы (РАН), 1994, № 2, с. 76–80.
133. Murray J.L. Calculations of the titanium-aluminum phase diagram // Metall. Trans., 1988, v. 19A, № 2, p. 243.
134. Fromm E., Jehn H. Solubility of Hydrogen in the Elements // Bull. alloy Phase Diagrams, 1984, v. 5, № 3, p. 324.
135. Ильин А.А., Мамонов А.М., Носов В.К., Майстров А.М. О влиянии водорода на диффузионную подвижность атомов металлической подрешетки β -фазы титановых сплавов // Металлы (РАН), 1994, № 5, с. 99–103.
136. Башкин И.О., Рабкин Е.И., Страумал Б.Б. Диффузия титана в сплавах цирконий–водород и цирконий–дейтерий // ФММ, 1992, № 3, с. 73.
137. Сидоренко В.И., Федоров В.В., Барабаш Л.В., Похмурский В.И. Ускоренные процессы самодиффузии в металлах под влиянием растворенного водорода // ФХММ, 1997, № 6, с. 27–30.
138. Колачев Б.А., Буханова А.А., Мальков А.В., Фролова Т.В. Влияние водорода на структуру титановых сплавов и протекающие в них фазовые превращения // Кристаллическая структура и свойства металлических сплавов: Сб. статей. – М.: Наука, 1978, с. 207–213.
139. Ильин А.А., Коллеров М.Ю., Экимян М.Г. Влияние температуры нагрева и скорости охлаждения на фазовый состав сплава BT23 // МИТОМ, 1987, № 3, с. 60–63.
140. Мамонов А.М., Петров В.А., Засыпкин В.В. Повышение комплекса свойств литых титановых сплавов термоводородной обработкой // Науч. тр. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. – М.: ЛАТМЭС, 1998, вып. 1 (73), с. 48–52.
141. Шоршоров М.Х., Фломенбит Ю.М., Масленков С.Б., Будичина Н.В. О причинах инициирующего влияния водорода на термоупругие мартенситные превращения в сплавах на основе никелида титана // ФММ, 1987, т. 64, вып. 3, с. 498–503.
142. Масленков С.Б., Будичина Н.В., Шоршоров М.Х., Фломенбит Ю.М. Эффекты памяти формы. Фазовые и структурные превращения, вызванные водородом в сплавах системы Ti–Ni // ФММ, 1988, т. 66, вып. 2, с. 307–312.
143. Металловедение титана и его сплавов / С.П. Белов, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов и др. Под ред. С.Г. Глазунова и Б.А. Колачева. – М.: Металлургия, 1992. – 352 с.
144. Колачев Б.А., Федорова Н.В., Мамонова Ф.С., Пименова А.В. Влияние водорода на устойчивость титанового мартенсита при деформации // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1982, № 3, с. 86–90.
145. Назимов О.П., Ильин А.А., Мальков А.В., Звонова Л.Н. Влияние водорода на структуру и физические свойства α -сплавов титана // ФХММ, 1979, т. 15, № 3, с. 24–30.
146. Назимов О.П., Ильин А.А., Коллеров М.Ю. О состоянии водорода в тита-

- не // ЖФХ, 1980, т. 54, с. 2774–2777.
147. Колачев Б.А., Вишняков Я.Д., Лясоцкая В.С. Влияние водорода на превращения в титановых сплавах // Митом, 1967, № 2, с. 21–24.
148. Колачев Б.А. Физическое металловедение титана. – М.: Металлургия, 1974. – 184 с.
149. Колачев Б.А., Назимов О.П., Ильин А.А., Мальков А.В. Влияние водорода на электронное строение и свойства β -сплавов титана // Электронное строение и физико-химические свойства тугоплавких соединений и сплавов: Докл. Всес. симпозиума. – Киев, 1973, с. 263–268.
150. Мамонов А.М., Кусакина Ю.Н., Фенина И.В. Анализ влияния водорода на структуру и деформируемость литого титанового сплава с интерметаллидным упрочнением // Науч. тр. МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. – М: ЛАТМЭС, 1999, вып. 2 (74), с. 51–55.
151. Колачев Б.А., Лясоцкая В.С., Тараненко Г.Н. Влияние водорода на изотермические превращения в сплаве ВТ15 // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1967, № 3, с. 115–118.
152. Ильин А.А., Белова С.Б., Кобылкин А.Н. Изучение $\beta \leftrightarrow \omega$ -превращения в псевдо- β -титановом сплаве ВТ30, легированном водородом // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1986, № 6, с. 112–114.
153. Мамонов А.М., Ильин А.А. Фазовые и структурные превращения в водородосодержащих жаропрочных титановых сплавах при дегазации // Металлы (РАН), 1994, № 5, с. 104–108.
154. Ильин А.А., Носов В.К., Лебедев И.А., Засыпкин В.В. Рентгеновские исследования водородосодержащего α -титанового сплава ВТ5 в процессе нагрева и охлаждения // ФХММ, 1987, № 4, с. 35–38.
155. Ильин А.А., Мамонов А.М., Засыпкин В.В. и др. Термоводородная обработка литых α - и псевдо- α -сплавов // ТЛС, 1991, № 2, с. 31–38.
156. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Пер. с англ. Ч. 1. Термодинамика и общая кинетическая теория. – М.: Мир, 1978. – 808 с.
157. Садовский В.Д. Структурная наследственность стали. – М.: Металлургия, 1973. – 208 с.
158. Швед М.М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – Киев: Наукова думка, 1985. – 120 с.
159. Спивак Л.В., Скрябина Н.Е., Кац М.Я. Водород и механическое воздействие в металлах и сплавах. – Пермь: изд-во Пермского университета, 1993. – 344 с.
160. Zhang Tong-Yi, Chu Wu-Yang, Hsiao Chi-Mei. Mechanism of hydrogen induced softening // Scr. Met., 1986, v. 20, № 2, p. 225–230.
161. Senkov O.N., Jonas J.J. Solute softening of alpha titanium-hydrogen alloys // Advances in the Sci. and Technol. of Titanium Alloys Processing. Anaheim, California, 1996, TMS, 1997, p. 109–115.
162. Birnbaum H.K., Sofronis P. Hydrogen-Enhanced Localized Plasticity – a Mechanism for Hydrogen-Related Fracture // Mater. Sci. Eng., 1994, v. A176, p. 191–202.
163. Senkov O.N., Jones J.J. Solute strengthening in beta titanium-hydrogen alloys // Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing. Anaheim, California, 1996, TMS, 1997, p. 117–124.
164. Ильин А.А., Носов В.К. К вопросу о соотношении прочности α - и β -фаз в титановых сплавах при разной температуре // ДАН СССР, 1988, т. 301, № 1, с. 134–138.
165. Колачев Б.А., Носов В.К., Автономов Е.П. Особенности водородного пластифицирования титановых сплавов // Металлургия и металловедение цветных сплавов: Сб. статей. – М.: Наука, 1982, с. 191–196.
166. Hirt G., Winkler P.J. Superplasticity in advanced materials // Proc. III Intern. Conf. Osaka, 1991, p. 783–788.
167. Zhao L.R., Zhang S.Q., Yan M.G. Improvement in the superplasticity of Ti-6Al-4V alloy by hydrogenation // Superplasticity and Superplastic Forming Proc. Int. Conf. Bluin, Washington, August 1–4, 1988, TMS, p. 459–464.
168. Du Zhongquan, Wang Gaochao, Chen Yuxio e.a. Study on Effects of HVC Treatment on Improvement of Superplastic Behaviour of Ti-10V-2Fe-3Al // Titanium'92. Science and Technology, 1993, v. 1, p. 871–878.
169. Мазурский М.И., Мурзинова М.А., Салищев Г.А. и др. Использование водородного легирования для формирования субмикроструктурной структуры в двухфазных титановых сплавах // Металлы (РАН), 1995, № 6, с. 83–88.
170. Mursinova M.A., Mazurski M.I., Salishev G.A. e.a. Application of reversible hydrogen alloying for formation of submicrocrystalline structure in (α + β)-titanium alloys // Inter. J. Hydrogen Energy, 1997, v. 22, № 2/3, p. 201–204.
171. Колачев Б.А., Егорова Ю.Б., Глезер А.М. и др. Исследование теплофизических свойств сплавов Ti-H // Металлы (РАН), 1994, № 5, с. 85–91.
172. Ильин А.А., Назимов О.П., Никитич А.С. и др. Влияние наводороживания на структуру и свойства сплава ТН1 // ТЛС, 1984, № 3, с. 42–47.
173. Бочвар Г.А., Яновская Н.В. Влияние высокотемпературной газостатической обработки на процесс формирования структуры и механические свойства литых титановых сплавов // Титан, 1993, № 1, с. 21–23.
174. Колачев Б.А., Носов В.К., Лебедев И.А. и др. О целесообразности термической обработки литых α -титановых сплавов // Современные достижения в области металловедения и термообработки: Сб. статей. – Пермь, 1985, с. 104–109.
175. Wegman G., Albrecht J., Lutiering G. e.a. Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Castings // Z. Metallkunde, 1997, bd. 88, p. 764–773.
176. Аношкин Н.Ф., Брун М.Я., Шаханова Г.В. Требования к бимодальной структуре с оптимальным комплексом механических свойств и режимы ее получения // Титан, 1998, № 1 (10), с. 35–41.
177. Полуфабрикаты из титановых сплавов / Под ред. Н.Ф. Аношкина и М.З. Ерманка. – М.: ВИЛС, 1996. – 581 с.
178. Apgar L.S., Yolton C.I., Sagib M. e.a. Microstructure and Property Modification of Cast alpha-2 Titanium Alloys by Thermochemical Processing with Hydrogen / Titanium'92. Science and Technology: Proc. 7th World Titanium Conf. San-Diego, Calif., 1992, v. 2, p. 1331–1335.
179. Ilyin A.A., Polkin I.S., Mamonov A.M. e.a. Properties combination increasement by means of thermohydrogen treatment of weldments of titanium alloys // Int. Aerospace Congress. IAC'94, Proc., 1994, v. 2, p. 500–503.
180. Мальков А.В., Низкин И.Д., Шевченко В.В. Термоциклическая обработка титановых сплавов с использованием водородного наклепа // ФХММ, 1991, № 1, с. 109–112.
181. Колачев Б.А., Фишгойт А.В., Лебедев И.А. Прямые наблюдения распространения усталостной трещины в сплаве ВТ5Л // ФММ, 1985, т. 59, № 3, с. 600–604.
182. Фишгойт А.В., Майстров В.М., Ильин А.А. и др. Взаимодействие малых трещин со структурой металлов // ФХММ, 1989, № 6, с. 24–27.
183. Глазунов С.Г., Павлов Г.А., Тетюхин В.В. Алюминиды титановых спла-

- вов как новые конструкционные материалы для авиакосмического машиностроения // *Металловедение и термическая обработка: Сб. статей.* – М.: ВИЛС, 1991, с. 84–92.
184. Froes F.H., Suryanarayana C., Elizer D. Production, characteristics and commercialization of titanium aluminides // *ISIJ International*, 1991, v. 31, N 10, p. 1235–1248.
185. Lutjering G., Proske G., Terlinde G. e.a. Influence of Microstructure, Texture and Environment on Tensile Properties of Super Alpha 2. // *Titanium '95. Science and Technology. Proc. Eighth World Conf. on Titanium Birmingham, UK, 1996, v. 1, pp. 332–339.*
186. Proske G., Lutjering G., Albrecht I. e.a. On the Influence of the Phase Morphology on the Mechanical Properties of the twophase Intermetallic Compound super Alpha 2 // *Titanium '92. Science and Technology. TMS, 1993, pp. 1187–1195.*
187. Аксенов Ю.А., Башкин И.О., Колмогоров В.Л. и др. Влияние водорода на пластичность и сопротивление деформации технического титана // *ФММ*, 1987, т. 67, № 5, с. 993–999.
188. Носов В.К., Белова С.Б., Чесноков И.Н. Пластичность и сопротивление деформации титанового сплава BT5-1, легированного водородом // *Металлы (РАН)*, 1995, № 6, с. 76–82.
189. Носов В.К., Овчинников А.В., Елагина Л.А. и др. Водородное пластифицирование при горячей деформации титанового сплава BT20 // *ТЛС*, 1990, № 6, с. 42–48.
190. Овчинников А.В., Носов В.К. Влияние водорода на пластичность и сопротивление деформации жаропрочных титановых сплавов в интервале температур теплой деформации // *ТЛС*, 1991, № 6, с. 12–19.
191. Носов В.К., Овчинников А.В., Елагина Л.А., Андреева Л.В. Водородное пластифицирование при горячей деформации титанового сплава BT20 // *Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Сб. науч. тр.* – Тула: ТГУ, 1996, с. 178–182.
192. Понятовский Е.Г., Башкин И.О., Сеньков О.Н. и др. Влияние водорода на пластичность и сопротивление деформации титанового сплава BT20 при температурах до 740° С // *ФММ*, 1989, т. 68, № 6, с. 1167–1172.
193. Башкин И.О., Понятовский Е.Г., Сеньков О.Н. и др. Влияние скорости деформации на эффект водородного пластифицирования титанового сплава BT20 в интервале температур 500–800° С // *ФММ*, 1990, т. 69, № 2, с. 170–177.
194. Анисимова Л.И., Елкина О.А. Структура и свойства сплава BT20, легированного водородом // *Металлы (РАН)*, 1995, № 6, с. 59–63.
195. Анисимова Л.И. Анализ диаграмм деформации титановых сплавов, легированных водородом // *ФММ*, 1999, т. 87, № 5, с. 94–103.
196. Башкин И.О., Малышев В.Ю., Анисимов Ю.А. и др. Влияние водорода на пластичность и сопротивление деформации титанового сплава BT6 при температурах до 930° С // *ФММ*, 1990, № 5, с. 168–174.
197. Анисимова Л.И., Аксенов Ю.А., Бадаева М.Г. и др. Обратимое легирование водородом и деформация титанового сплава BT6 // *МиТОМ*, 1992, № 2, с. 43–45.
198. Колачев Б.А., Полоскин Ю.В., Седов В.И. и др. Влияние водорода на структуру и механические свойства титанового сплава BT3-1 // *МиТОМ*, 1992, № 1, с. 32–33.
199. Володин В.А. Водородная технология производства титановых деталей крепления. Применение НТМО для изготовления высокопрочных изделий. – Нижний Новгород: Волго-Вятское книжное изд-во, 1997. – 154 с.
200. Мальков А.В., Колачев Б.А., Низкин И.Д. и др. Влияние водорода на структуру и технологические свойства сплава BT16 // *Изв. вузов. Цветная металлургия*, 1990, № 6, с. 96–100.
201. Носов В.К., Елагина Л.А., Белова С.Б. и др. Эффект водородного пластифицирования при изотермической осадке титанового сплава BT9 // *Кузнечно-штамповочное производство*, 1985, № 5, с. 28–30.
202. Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы и перспективы их развития // *Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. 1-я Межд. конф. по титану стран СНГ.* – М.: ВИЛС, 1994, с. 567–582.
203. Овчинников А.В., Мамонов С.А., Нестеров П.А. Водородное пластифицирование высокопрочных титановых сплавов в условиях холодной деформации // *Водородная обработка материалов ВОМ-2001. 3-я Межд. конф.* – Донецк – Мариуполь, 2001, с. 221–224.
204. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 183 с.
205. Применение титана в народном хозяйстве / С.Г. Глазунов, С.Ф. Важенин, Г.Д. Зюков и др. – Киев: Техника, 1975. – 200 с.
206. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.
207. Технология производства деталей крепления из титановых сплавов / В.А. Володин, И.А. Воробьев, Б.А. Колачев и др. – М.: Металлургия, 1996. – 144 с.
208. Nakamura Sadayuki. Разработка легкообрабатываемого сплава титана. «Тэцу то хаганэ» // *J. Iron and Steel Inst. Jap*, 1987, 73, № 5, p. 711.
209. Макаров А.Д. Оптимизация режимов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
210. Колачев Б.А., Егорова Ю.Б., Талалаев В.Д., Кравченко А.Н. Влияние водорода на обрабатываемость резанием титанового сплава BT5-1 // *ФХММ*, 1996, № 6, с. 107–115.
211. Ильин А.А., Егорова Ю.Б., Мамонов А.М., Вилков В.И. Улучшение обрабатываемости резанием титанового сплава BT23 термоводородной обработкой // *ТЛС*, 2000, № 6, с. 40–45.
212. Колачев Б.А., Егорова Ю.Б., Седов В.И. и др. Легирование поверхностных слоев титанового сплава BT3-1 водородом // *Вестник машиностроения*, 1991, № 17, с. 31–32.
213. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
214. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
215. Фиглин С.З., Бойцов В.В., Калтин Ю.Г., Каплин Ю.И. Изотермическое деформирование металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
216. Овчинников А.В., Афонин В.Е. Изотермическая штамповка жаропрочных титановых сплавов с использованием водородного пластифицирования // *Водородная обработка материалов: Сб. статей.* – Донецк, 1998, с. 108.
217. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.
218. Новиков И.И., Портной К.М. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. – М.: Металлургия, 1981. – 168 с.
219. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 264 с.

220. Гринберг В.М., Овчинников А.В., Носов В.К. Перспективы повышения эффективности изотермической штамповки титановых сплавов // ТЛС, 1991, № 8, с. 23–26.
221. Носов В.К., Нарсков Г.Г., Филиппов Ю.Н. Фасонирование выдавливанием заготовок под штамповку лопаток из жаропрочных титановых сплавов с применением водородного пластифицирования // Совершенствование кузнечно-штамповочного производства: Сб. статей. – М.: НИАТ и ТОО «НИАТ-Технокон», 1993, с. 27–32.
222. Носов В.К., Колачев Б.А., Павлов Е.И. Водородное пластифицирование жаропрочных титановых сплавов // Изв. АН СССР. Металлы, 1983, № 1, с. 134–137.
223. Мамонов А.М. Влияние термоводородной обработки на структуру, текстуру и механические свойства изделий из жаропрочного титанового сплава BT18U // Металлы (РАН), 1995, № 6, с. 106–112.
224. Овчинников А.В., Мамонов А.М., Чугунова В.М. Эксплуатационные характеристики изделий из сплава BT25U, полученных по водородной технологии // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. 1-я Межд. научно-техн. конф. по титану стран СНГ. – М.: ВИЛС, 1994, т. 1, с. 492–499.
225. Носов В.К., Овчинников А.В., Елагина Л.А., Андреева Л.В. Влияние водородного на пластичность и сопротивление деформации титановых сплавов в интервале температур теплой деформации // ТЛС, 1991, № 6, с. 12–19.
226. Носов В.К., Колачев Б.А., Нартова Т.Т. и др. Водородное пластифицирование титановых сплавов при горячей деформации // Кузнечно-штамповочное производство, 1978, № 6, с. 4–12.
227. Глазунов С.Г., Борзцовская К.М. Порошковая металлургия титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1989. – 136 с.
228. Устинов В.С., Олесов Ю.Г., Дрозденко В.А., Антипин Л.Н. Порошковая металлургия титана. – М.: Металлургия, 1981. – 248 с.
229. Mukhopadhyay D.K., Suryanarayana C., Froes F.H. Synthesis of titanium aluminides using a combined mechanical alloying and thermochemical processing approach // Titanium'92. Sci and Techn. San-Diego, 1993, v.1, p. 829–835.
230. Steele L.S., Eylon D., Froes F.H. Microstructure Control of Titanium Aluminide Powder Compacts by Thermochemical Treatment // Advances in Powder Metallurgy. Princeton. 1989, v. 3, p. 509–523.
231. Apgar L.S., Eylon D. Microstructure Control of Titanium Aluminide Powder Compacts by Thermochemical Processing // ISIJ. International, 1991, v. 31, № 8, p. 915–921.
232. Mukhopadhyay D.K., Srisukhumbovornchai N., Senkov O.N., Froes F.H. Synthesis of Titanium Aluminides Using a Combined Mechanical Alloying and Thermohydrogen Processing Approach // Advanced Particulate Materials and Processes. Princeton, 1997, p. 145–152. Titanium'92. Science and Technology. TMS, 1993, p. 829–835.
233. Диффузионная сварка титана / Э.С. Каракозов, Л.М. Орлова, В.В. Пешков и др. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
234. Гельман А.А. Диффузионная сварка изделий из титановых сплавов // ТЛС, 1979, № 4, с. 81–87.
235. Аношкин Н.Ф., Фролов В.А. Проблема использования отходов в шихте при производстве слитков титановых сплавов // Титан, 1993, № 4, с. 25–29.
236. Шевченко В.В., Колачев Б.А., Талалаев В.Д. и др. Перспективы производства и применения полученных по водородной технологии пресс-изделий из титановых отходов // ТЛС, 1998, № 4, с. 38–44.

237. Колачев Б.А., Шевченко В.В., Низкин И.Д. и др. Структура и механические свойства прессованных прутков, полученных из титановой стружки без ее переплавки // Изв. вузов. Цветная металлургия, 1995, № 1, с. 59–63.
238. Сергеева А.В., Латышев В.В., Родионов Б.В., Валиев Р.З. Процесс получения полуфабрикатов компактированием из стружки титановых сплавов // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии. 1-я Межд. научно-техн. конф. по титану стран СНГ. – М.: ВИЛС, 1994, т. 1, с. 273–282.
239. Okazaki K., Morinaka K., Conrad H. Grain growth kinetics in Ti-O alloys // Trans. Jap. Inst. Metals, 1973, 14, № 3, p. 202.
240. Tanoue Koji, Okazaki Kanji // Нихон киндзоку гаккаиси, 1973, 37, № 5, с. 535.
241. Suennaga Hiroyoshi // Тэцу то хагане, 1986, 72, № 5, с. 6951.
242. Воздвиженский В.М., Мамонов А.М., Воздвиженская М.В. и др. Исследование закономерностей разрушения титанового сплава BT23 после термоводородной обработки // Металлы (РАН), 1995, № 6, с. 113–119.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава I. Взаимодействие титана и его сплавов с водородом	16
1.1. Диаграмма состояния системы титан—водород	16
1.2. Влияние легирующих элементов на равновесия в системе Ti—H	24
1.3. Кинетика взаимодействия титана и его сплавов с водородом	30
1.4. Технология наводороживания титановых сплавов	38
1.5. Вакуумный отжиг титановых сплавов	50
Глава II. Научные основы водородной технологии титановых сплавов	63
2.1. Влияние водорода на фазовые равновесия в титановых сплавах	64
2.2. Влияние водорода на количество и химический состав α - и β -фаз в промышленных титановых сплавах	71
2.3. Влияние водорода на устойчивость интерметаллида Ti_3Al	78
2.4. Влияние водорода на диффузионную подвижность основных компонентов в сплавах на основе титана	82
2.5. Влияние водорода на фазовые превращения в титановых сплавах при непрерывном охлаждении	85
2.6. Влияние водорода на фазовые и структурные превращения в титановых сплавах при закалке и старении	90
2.7. Фазовые и структурные превращения в наводороженных титановых сплавах при их дегазации	101
2.8. Влияние водорода на объемные эффекты фазовых превращений в титановых сплавах	105
2.9. Влияние водорода на напряжения течения титановых сплавов	110
2.10. Влияние водорода на теплофизические свойства титана	123
2.11. Основные направления водородной технологии	

титановых сплавов	127
Глава III. Термоводородная обработка	132
3.1. Технологические схемы термоводородной обработки титановых сплавов	133
3.2. Термоводородная обработка фасонных отливок	141
3.3. Термоводородная обработка сварных соединений	154
3.4. Термоводородная обработка деформированных полуфабрикатов	161
Глава IV. Водородное пластифицирование титановых сплавов	174
4.1. Технический титан	174
4.2. α -титановые сплавы	178
4.3. Жаропрочные псевдо- α -сплавы	184
4.4. Конструкционные ($\alpha+\beta$)-сплавы общего назначения ..	201
4.5. Жаропрочные ($\alpha+\beta$)-титановые сплавы	211
4.6. Сплавы переходного класса	224
4.7. Сплавы с большой объемной долей α_2 -фазы (Ti_3Al) ...	234
4.8. Сплавы на основе алюминида Ti_3Al	241
Глава V. Механоводородная обработка	247
5.1. Влияние водорода на параметры резания титановых сплавов	249
5.2. Влияние термоводородной обработки на обрабатываемость титановых сплавов резанием	261
5.3. Оценка рациональных режимов механоводородной обработки	265
5.4. О природе благоприятного влияния водорода на обрабатываемость титановых сплавов резанием	271
Глава VI. Комплексные водородные технологии	278
6.1. Водородная технология производства деформированных полуфабрикатов	278
6.1.1. Перспективы водородной технологии обработки титановых сплавов давлением	278
6.1.2. Перспективы повышения эффективности изотермической штамповки жаропрочных титановых сплавов путем водородного пластифицирования	280
6.1.3. Изотермическая штамповка заготовок лопаток из сплава BT3-1	287
6.1.4. Водородная технология изготовления лопаток компрессора из сплава BT18Y	289

6.1.5. Изотермическая штамповка лопаток из сплава VT20	295
6.1.6. Водородная технология изготовления лопаток из сплава VT25U	297
6.1.7. Деформированные полуфабрикаты из сплава СТ4	303
6.1.8. Водородная технология изготовления деформированных полуфабрикатов из сплавов на основе Ti ₃ Al	306
6.1.9. Деформированные полуфабрикаты из сплава VT5-1	309
6.1.10. Производство холоднокатаных листов из сплава VT22И. Листовая штамповка	310
6.1.11. Водородная технология изготовления деталей крепления из сплава VT16	314
6.1.12. Водородная технология листовой штамповки сплава VT30	317
6.2. Порошковая металлургия	319
6.3. Диффузионная сварка	322
6.4. Водородная технология производства пресс-изделий из титановых отходов без их переплавки	325
6.5. Водородная технология фасонного литья	336
6.5.1. Защитные водородные покрытия	337
6.5.2. Безотходное отделение литников и прибылей от отливок	345
6.5.3. Водородная технология горячего изостатического прессования (высокотемпературной газостатической обработки)	352
6.5.4. Водородная технология переработки и подготовки к использованию литейных отходов	364
Заключение	368
Библиографический список	374

ПРОНОСЪЕТАНТЕ КИНИИ
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА СТАЛИ И СПЛАВОВ
(ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО)
Научное издание

ИЛЬИН Александр Анатольевич
КОЛАЧЕВ Борис Александрович
НОСОВ Владимир Константинович
МАМОНОВ Андрей Михайлович

ВОДОРОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Редактор *И.Е. Оратовская*

Художественный редактор *А.Н. Степанова*

Оригинал-макет выполнил *А.А. Ефимов*

Переплет художника *А.И. Гавриченкова*

ИБ № 73

ЛР № 020777 от 13.05.1998

Подписано в печать 19.04.2002 г. Формат бумаги 60×90 1/16

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.

Печ. л. 24,5. Усл.-печ. л. 24,5. Уч.-изд. л. 26,8. Тираж 600 экз.

Изд. № 188/017-з Заказ 6084

•МИСИС• 119991, ГСП, Москва, В-49, Ленинский пр., 4

Отпечатано в соответствии с качеством представленного

оригинал-макета в ППП «Типография «Наука»

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6