

ГОРЯЧЕЕ ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ ПРЕССОВАНИЕ ГРАНУЛ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ВОДОРОДОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т. В. Бондаренко, А. И. Дмитренко, В. С. Рачук

ОАО «Конструкторское бюро Химвавтоматики»
cadb@comch.ru

Надежность и ресурс жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) с дожиганием, работающих на криогенных компонентах, в значительной мере зависят от выбранных для изготовления материалов и технологий.

Особо сложной задачей является обеспечение работоспособности конструкционных материалов в турбонасосных агрегатах (ТНА) с насосами, работающими на высокоактивных криогенных жидкостях (водород), и с турбинами, работающими на высокотемпературном водородосодержащем газе.

Высокие статические и динамические нагрузки, возникающие в процессе работы кислородно-водородных двигателей, влияют, прежде всего, на работоспособность материалов рабочих колес водородного насоса и турбины, как наиболее напряженных элементов не только ТНА, но и всего ЖРД в целом.

Применение водорода в качестве высоко экологического и энергоемкого топлива акцентирует внимание на проблеме водородной деградации физико-механических свойств конструкционных материалов (КМ), проявляющейся в снижении прочностных и пластических характеристик, снижении малоциклового усталости, трещиностойкости, усталостной и длительной прочности и приводящей, в конечном итоге, к преждевременному разрушению конструкции.

Водородная деградация КМ – это многообразные проявления различных факторов отрицательного влияния водорода на прочность и целостность конструкции, которая проявляется в виде [1]:

- обратимого водородного охрупчивания;
- химической и физико-химической деградации металлов;
- «водородной деструкции».

В первой группе явлений отрицательное воздействие водорода полностью снимается при его удалении из металла, тогда как вторая и третья группы явлений вносят в структуру металлов необратимые изменения, которые остаются при удалении водорода.

Следует отметить, что механизмы и условия возникновения необратимых изменений достаточно и глубоко изучены и предложены эффективные методы борьбы с ними [2].

Обратимое водородное охрупчивание представляет собой наиболее слабое звено в представлениях о взаимодействиях водорода с металлами. Оно присуще большинству сплавов на основе железа, а также другим сплавам, не образующим гидридов в условиях низкотемпературного взаимодействия (до 473 К).

Размер атома водорода минимальный, поэтому водород легко проникает в дефекты структуры материала. Водород во время деформирования материала (железа и его сплавов), хемосорбируясь на активированных деформацией внешних и внутренних поверхностях в поврежденных объемах или дислокационных скоплениях, ослабляет межатомные связи металла, облегчая их разрыв и перестройку. Теоретически доказано, что при равномерном распределении водорода в стали наибольшая концентрация, которую можно достичь при нормальных условиях, составляет 1 атом водорода на 10^3 – 10^4 атомов металла. Поэтому основной причиной, обуславливающей изменения свойств, является стремление атомов водорода к локализации [3].

Из вышесказанного вытекает важный практический вывод о том, что реальное поведение материалов определяет водород, локализованный в дефектах строения, и для обеспечения безаварийной эксплуатации деталей и узлов в среде водорода конструкционные материалы, применяемые для их изготовления, должны иметь абсолютно бездефектную структуру, что является, в принципе, невыполнимой задачей.

Обеспечение практически бездефектной структуры конструкционных материалов связано с технологией горячего изостатического прессования гранул, что должно существенно повысить их водородостойкость.

Эта технология способна решать сложнейшие задачи при разработке новых высоконагруженных изделий. Получение порошков для данного способа изготовления деталей основано на нарушении сплошности материала электрода, расплава его на частицы (капли) и воздействия на них центробежных сил. Получаемые по такому принципу порошки называются гранулами, а сам процесс получения заготовок – горячим изостатическим прессованием гранул (ГИП – Насыпная плотность гранул в зависимости от марки материала составляет $\sim 2,9$ г/см³ для титановых сплавов и $\sim 5,6$ г/см³ для никелевых сплавов. Сами гранулы представляют собой микрослитки, лишенные ликвационной неоднородности, с равномерно распределенными легирующими элементами и мелкодисперсной структурой. Размер гранул экспериментально установлен в интервале 60–190 мкм, что обеспечивает требуемое качество поверхности и ресурс работоспособности изделий, а также приемлемую стоимость изготовления. Такой исходный материал существенно отличается от используемых слитков, литых деталей, особенно крупногабаритных.

Сравнительный анализ механических характеристик и структуры литых и гранульных деталей из сплавов аналогичного химического состава выявил несомненные преимущества гранульных материалов, скомпактированных методом горячего изостатического прессования. Во-первых, гранульные материалы имеют практически 100 % плотность и не содержат дефектов, неизбежных при литье (пор, раковин, рыхлот, неметаллических включений). Во-вторых, структура этих материалов характеризуется мелким зерном, однородностью и изотропностью свойств независимо от размера сечения деталей, чего невозможно добиться при изготовлении деталей литьем, ковкой или штамповкой. Кроме того, в сравнении с литейными аналогами гранульные сплавы на основе никеля имеют в 1,3–1,5 раза большую прочность и в два с лишним раза большую пластичность. Механические характеристики гранульных титановых

сплавов находятся на уровне деформированного металла, но заготовки из гранульных титановых сплавов отличаются мелким зерном и изотропностью механических свойств. Кроме этого, ГИП повышает коэффициент использования металла, т. к. позволяет формировать профиль с минимальной механической обработкой. В связи с этим процесс ГИП стал неотъемлемой частью при производстве деталей ответственного назначения.

Технология изготовления деталей из гранул различных сплавов достаточно хорошо освоена. Пионером в области развития гранульной металлургии в России является Всесоюзный институт легких сплавов (ВИЛС). С 1978 года в КБХА совместно с ВИЛС-началось освоение технологий горячего изостатического прессования гранул для крыльчаток водородного насоса и рабочих колес турбины ТНА маршевого кислородно-водородного двигателя РД-0120 ракетно-космической системы «Энергия-Буран». В результате этой работы КБХА впервые в ЖРД внедрило метод ГИП для крыльчаток насосов, рабочих колес турбины и резьбовых крепежных деталей фланцевых разъемов турбины. Во всех последующих разработках ЖРД в КБХА технология ГИП стала неотъемлемой технологией создания ТНА.

Специалисты КБХА, опираясь на опыт ВИЛС и на основании собственных проведенных работ, выработали свой подход к проектированию специальной оснастки, позволяющий получать за счет различной жесткости и направленной деформации детали сложной формы с припусками в десятые доли мм при усадке гранул до 33 % в процессе компактирования [4]. Принцип расчета и проектирования специальной оснастки заключается в использовании закладных и подкладных элементов, формирующих внутренние полости готовых деталей и удаляемых впоследствии, что практически позволяет исключать внутреннюю механическую обработку. От тщательности и правильности проработки и изготовления капсул, закладных и подкладных элементов зависит качество и геометрическая точность будущих деталей. Одним из преимуществ гранульной металлургии является возможность получения заготовок, весьма близких по конфигурации к размерам готовой детали.

Применительно к ТНА кислородно-водородных ЖРД рассмотрим использование заготовок из титановых сплавов ВТ5-1кТ и ВТ6С и никелевых сплавов ЭП741П и ЭП741НП, полученных методом ГИП.

Рабочие колеса водородного насоса

Трехступенчатый водородный насос ТНА кислородно-водородного двигателя РД-0120, созданный КБХА для ракетно-космической системы «Энергия» – «Буран», имеет три рабочих колеса, относящихся к высоконагруженным элементам конструкции агрегата. В одной ступени насоса реализуется перепад давлений до 17 МПа при окружной скорости рабочего колеса, достигающей 600 м/с. Расчетным путем было установлено [5], что величина напряжений от действия центробежных нагрузок достигает в основном и покрывном дисках ~ 550 МПа, в лопатках – ~ 740 МПа, в ступице – ~ 830 МПа. Сложность конструкции и высокая напряженность рабочих колес (РК), в том числе созда-

ваемая за счет динамических нагрузок, приводят к необходимости детального анализа проблемы прочности РК как при выборе материалов, так и при проектировании и доводке конструкции.

В качестве критерия применимости материалов может быть использован такой параметр как удельная прочность материала σ_B/ρ . Применительно к вращающимся деталям указанный параметр может быть представлен в виде $C_0 = \sqrt{\sigma_B/\rho}$. Параметр C_0 достаточно широко используется при предварительном выборе материалов. Но, несмотря на очевидную простоту и практическую полезность этого параметра, указанный критерий обладает одним существенным недостатком, он не учитывает пластичность, которая имеет большое значение при использовании высокопрочных материалов и при выборе материалов для деталей, работающих при криогенных температурах и в среде газообразного водорода высокого давления.

Наряду с параметром C_0 может быть предложена аналогичная зависимость, вытекающая из механики разрушения [5]. В механике разрушения характеристикой надежности материала и его способности сопротивляться хрупкому разрушению при наличии дефектов является отношение $(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2$. Вязкость разрушения K_{Ic} связана с разрушающим напряжением и пластичностью материала, причем отношение K_{Ic}/ρ может рассматриваться как некоторый аналог удельной прочности. Комбинируя эти два указанных отношения, получим следующее выражение $C_2 = \sqrt{(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2 K_{Ic}/(\rho l^{3/2})}$. В этой формуле l – характерный размер дефекта, например, длина.

Дальнейшее развитие рассматриваемого подхода основано на учете обоих параметров C_0 и C_2 , из которых первый связан непосредственно с прочностью материала, а второй – с надежностью. Комбинация указанных параметров приводит к выражению $C_k = \sqrt{C_0 C_2}$. Параметры C_0 , C_2 и C_k имеют размерность м/с.

Изначально на стадии проработки конструкции предполагалось изготавливать РК из титановых или алюминиевых сплавов.

В табл. 2 приведены результаты расчетов удельной прочности материалов, представленных в табл. 1. Как следует из табл. 2, при температуре 293К титановые сплавы ВТ5-1кт и ВТ6С и алюминиевый сплав АК6 без учета пластичности имеют близкие значения параметра C_0 . Однако, с учетом вязкости разрушения (параметр C_k), преимущества по удельной прочности имеет титановые сплавы ВТ5-1кт и ВТ6С. Вместе с тем следует иметь в виду, что в среде водорода при температуре 293 К в сплаве ВТ5-1кт наблюдается более существенное, чем в сплаве ВТ6С, падение пластичности. Поэтому, при работе конструкции в среде водорода при температуре 293 К, предпочтение следует отдать сплаву ВТ6С по сравнению со сплавом ВТ5-1кт. На основании проведенного анализа для рабочих колес водородного насоса двигателя РД-0120 был выбран титановый сплав ВТ5-1кт.

Таблица 1

Материал	$T = 293 \text{ K}$			$T = 20 \text{ K}$		
	C_0	C_2	C_K	C_0	C_2	C_K
Титановый сплав ВТ5-1кт деформированный	425,4	615,3	511,6	582,5	202,0	342,0
Титановый сплав ВТ6С деформированный	452,2	508,3	479,4	599,6	194,5	341,5
Алюминиевый сплав АК6	413,4	306,5	355,9	478,6	200,4	309,7

Таблица 2

Материал	ρ , кг/м ³	σ_B , МПа		$\sigma_{0,2}$, МПа		ψ , %	
		293 К	20 К	293 К	20 К	293 К	20 К
Титановый сплав ВТ5-1кт деформированный	4420	800	1500	750	1300	25	14
Титановый сплав ВТ6С деформированный	4450	850	1550	850	1500	25	-
Алюминиевый сплав АК6 деформированный	2750	470	630	390	470	33	20
Титановый сплав ВТ5-1кт, полученный ГИП	4460	736	1324	687	1226	20	15

При выборе марки титанового сплава для РК необходимо учитывать механические характеристики сплавов, обеспечиваемые принятой технологией изготовления и термообработки. Как отмечалось ранее, существенным достоинством обладают сплавы, получаемые методом горячего изостатического прессования. По такой технологии получены заготовки РК из титановых сплавов ВТ5-1кт и ВТ6С. В заготовках, получаемых методом ГИП, не только обеспечивается высокая прочность и пластичность материала, но и практически отсутствуют дефекты, достигается однородная мелкозернистая структура материала в сравнении с литым вариантом изготовления. Успешное освоение технологии изготовления методом ГИП рабочих колес из титанового сплава ВТ5-1кт предопределило выбор в пользу этого материала. Именно поэтому в ТНА двигателя РД-0120 для высоконагруженных РК водородного насоса применены заготовки из титанового сплава ВТ5-1кт, получаемые методом ГИП. Лопатки и покрывной диск РК формируются закладным элементом и одновременно сращиваются с основным диском методом ГИП. Подкладной элемент (основной диск) выполняется из отдельной заготовки. После ГИП закладной элемент удаляется и между основным и покрывным дисками образуется проточная часть с рабочими лопатками. После прессования заготовки поверхности межлопаточных каналов РК не подвергаются механической обработке. Качество заготовки РК контролируется ультразвуковым методом, контроль механических характеристик осуществляется при нормальной и при рабочей температуре (20 К) испытаниями на растяжение стандартных (гладких и с надрезом) образцов, вырезанных из припуска заготовки.

Первоначально при ГИП заготовки РК двигателя РД-0120 использовалась штампованная заготовка подкладного элемента из титанового сплава ВТ5-1кт. Впоследствии была освоена технология получения заготовки РК методом ГИП с использованием подкладного элемента, также изготовленного методом ГИП. Величина макрозерна штампованной части РК составляет 7 баллов по шкале инструкции ВИАМ № 1054-76, тогда как в гранульной части не превышает 4 баллов, что позволило обеспечить с переходом на гранульную технологию равномерную мелкозернистую структуру по всему сечению заготовки и улучшить качество соединения.

При испытаниях РК получены скорости, соответствующие разрушению, до 780 м/с в воздушной среде нормальной температуры и до 930 м/с в среде водорода при рабочей температуре. РК из титанового сплава ВТ5-1кт, изготовленные методом ГИП, отличаются высокой стабильностью разрушающей скорости. Разница между максимальной и минимальной разрушающими скоростями при комнатной температуре составляет всего 8 %, для криогенных температур (60 К) значение разрушающей скорости вращения на ~ 20–25 % выше разрушающей скорости вращения при комнатной температуре [6].

РК, изготовленные из титанового сплава ВТ5-1кт методом ГИП, показали высокую работоспособность при эксплуатации ТНА в составе двигателя. Опыт эксплуатации двигателя показал, что такие колеса обладают высокой живучестью. Даже при значительных повреждениях, вызванных разрушением элементов конструкции насоса, РК сохраняли работоспособность. Это свидетельствует о том, что при их производстве рационально сочетаются конструкция, материал и технология изготовления.

Рабочие колеса турбины

Совершенство двигателя в значительной степени зависит от напряженности колес турбины. Поэтому в водородных двигателях лопатки рабочего колеса турбины (РКТ) всегда являются высоконапряженными элементами конструкции, определяющими ресурс двигателя. Сложность условий работы РКТ заключается в воздействии на него ряда трудно учитываемых факторов: кратковременного повышения температуры при запуске и выключении двигателя, неравномерности температурного поля на входе, пульсаций давления в проточной части, способа выхода на режим и порядка выключения, циклограммы работы двигателя, деформации диска из-за утечек в турбину холодного водорода. Сложные условия работы колеса турбины усугубляются воздействием высокотемпературного водорода, влияющего, как правило, на пластичность материала.

Рабочие колеса турбины ТНА двигателя РД-0120 выполнены из гранул жаропрочного и высокопрочного никелевого сплава ЭП741П методом ГИП. Диск, лопатки и бандаж выполняются за одно целое. Качество РКТ контролируется ультразвуковым методом. В РКТ, как и в других высоконагруженных деталях, механические характеристики материала контролируются испытаниями на растяжение стандартных образцов. Контроль механических характеристик материала проводится на образцах, вырезанных из каждой заготовки. Дополнительно контролируется длительная прочность материала.

Уровень механических свойств материала при комнатной и рабочей температурах представлен в табл. 3.

Таблица 3

Марка сплава	$T_{исп.}, K$	σ_B, MPa	σ_{02}, MPa	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$KCU, Дж/см^2$
ЭП741П	293	1226	785	13	15	49
	1073	932	785	15-22	18-25	
ЭП741НП	293	1275	834	13	15	39
	1073	1005	830	27	29	

При испытаниях в воздушной среде нормальной температуры получена скорость, соответствующая разрушению, до 725 м/с.

При длительных испытаниях двигателей на повышенных режимах наблюдались дефекты на лопатках РКТ второй ступени турбины, причиной которых явилось сочетание действующих высоких напряжений от центробежных сил бандажа и высокотемпературного водорода [6,7].

Анализ показал, что трещины вследствие многоциклового нагружения носят усталостный характер и их образование связано как с особенностью поведения сплава ЭП741П в среде газообразного водорода высокого давления, так и с достаточно высокой напряженностью лопаток РКТ [8]. Исследованием установлено, что при воздействии водорода высокого давления (~ 30 МПа) при температуре 970–1170 К в сплаве происходит образование измененного поверхностного слоя, характеризующегося превращенной структурой γ' – фазы. Наличие слоя незначительно снижает циклическую долговечность и относительное сужение материала, однако непосредственной корреляции разрушения лопаток РКТ, связанной с измененным слоем, не установлено.

Для рабочих колес турбин может использоваться сплав ЭП741НП, имеющий несколько повышенный уровень механических характеристик (табл. 3). Однако испытания данного материала в среде водорода с имитацией рабочих условий не выявили его преимуществ по отношению к сплаву ЭП741П. Сплав ЭП741НП применяется в КБХА при изготовлении РКТ кислородно-керосинового двигателя РД-0124 для ракет-носителей «Союз-2» и «Ангара».

Водородостойкость материалов

Стойкость материалов к водородному охрупчиванию оценивается безразмерным коэффициентом β , равным отношению какой либо технической характеристики, полученной при испытаниях в водороде, к такой же характеристике при испытаниях на воздухе (в инертной среде)

$$\beta = X_{H_2} / X_B,$$

где X – среднее значение, полученное в опыте, нижние индексы: H_2 – в водороде; B – на воздухе (в инертной среде).

Основными критериями, дающими наиболее яркое представление о работоспособности материалов в среде водорода и используемыми в инженерных расчетах, являются коэффициенты β_{σ} , β_{ψ} , β_N , характеризующие, соответственно, снижение прочности и пластичности материала, а также малоцикло-вой усталости при низких скоростях нагружения при испытании образцов. По степени охрупчивания принято разделять КМ на четыре категории:

- экстремально охрупчиваемые – $\beta < 0,5$;
- сильно охрупчиваемые – $0,5 < \beta < 0,75$;
- слабо охрупчиваемые – $0,75 < \beta < 0,9$;
- незначительно охрупчиваемые – $\beta > 0,9$.

Исследование водородостойкости гранулируемых конструкционных материалов, примененных в турбонасосных агрегатах, проводилось в исследовательском центре «Протон» (г. Львов, Украина) на стандартных гладких образцах при различных давлениях водорода и температурах в зависимости от условий эксплуатации. В табл. 4 представлены сравнительные характеристики влияния водорода на механические свойства сплава ЭП741П и титановых ВТ5-1кт и ВТ6-С.

Таблица 4

Материал	Температура испытания, К	σ_{02} , МПа		ψ , %		$\beta_{\psi} = \psi_{H_2}/\psi$
		Вакуум	H ₂	Вакуум	H ₂	
ЭП741П, P = 30 МПа	293	930	780	22	10	0,45
	1073	840	820	22	12	0,54
ВТ5-1кт, P = 35 МПа	293	710	650	34	30	0,88
ВТ6С, P = 35 МПа	293	830	790	35	33	0,94

Как и все никелевые сплавы, сплав ЭП741П относится к категории достаточно охрупчиваемых газообразным водородом: при комнатной температуре потеря прочности составляет до 15 %, а пластичности – до 55 % в сравнении с инертной средой; при повышенных температурах вредное воздействие водорода на пластичность сплава несколько ослабевает. При этом благодаря отсутствию внутренних дефектов, являющихся источниками локализации водорода, РКТ показали высокую работоспособность в нагруженном состоянии, обеспечивая многократность включения ТНА в процессе эксплуатации.

В газообразном водороде комнатной температуры лучшей работоспособностью обладает сплав ВТ6С (табл. 4), тогда как в жидком водороде (табл. 1, 2) предпочтительнее сплав ВТ5-1кт, обладающий более высокими показателями пластичности при практически равнозначной прочности.

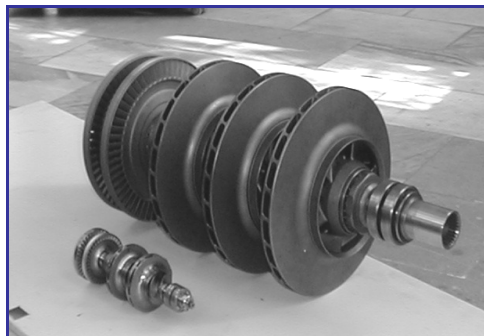


Рис. 1. Ротор ТНА двигателя РД-0120 (вверху) и ротор водородного ТНА двигателя РД-0146 (внизу)

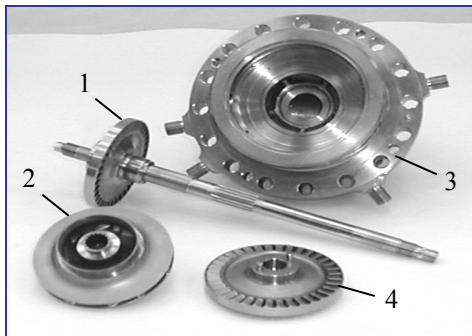


Рис. 2. Детали ТНА двигателя РД-0146, изготавливаемые из титановых сплавов методом ГИП: 1 – РК первой ступени турбины, 2 – РК второй ступени водородного насоса, 3 – направляющий аппарат водородного насоса, 4 – РК второй ступени турбины

Технология получения заготовок методом горячего изостатического прессования гранул используются в КБХА свыше 30 лет и показала высокую свою эффективность при эксплуатации ТНА кислородно-водородных двигателей. Эта технология использовалась для получения заготовок рабочих колес насосов ТНА двигателей РД-0120 и РД-0146 из титанового сплава ВТ5-1кт. Этот метод, отработанный в КБХА для рабочих колес насосов, используется также для изготовления заготовок сложнопрофильных направляющих аппаратов.

Для рабочих колес турбины кислородно-водородного двигателя РД-0120 и кислородно-керосинового двигателя РД-0124 используются гранульные никелевые сплавы ЭП741 и ЭП741НП. Для рабочих колес турбины двигателей безгенераторной схемы, турбина которых работает на газообразном водороде с температурой близкой к комнатной, успешно используется гранульный сплав ВТ6С.

На рис. 1 показаны роторы ТНА кислородно-водородных двигателей РД-0120 и РД-0146, в которых все рабочие колеса водородного насоса и турбины изготовлены с использованием метода ГИП [9]. Все детали ротора двигателя РД-0146, включая и вал, изготовлены методом ГИП из титановых сплавов ВТ5-1кт и ВТ6С (рис. 2). В ТНА, созданном КБХА для двигателя RL10 компании Пратт-Уитни Рокетдайн (США), изготовление рабочих колес и направляющего аппарата водородного насоса также выполняется методом горячего изостатического прессования гранул.

Выводы

Изготовление высоконагруженных деталей методом горячего изостатического прессования гранул открывает широкие возможности совершенствования технических характеристик, как турбонасосных агрегатов, так и ЖРД в целом. Наибольший эффект технологии ГИП гранул дают при их использо-

вании для рабочих колес водородных насосов и турбин кислородно-водородных ЖРД, так как при этом формируется практически бездефектная мелкозернистая структура, обеспечиваются изотропные механические характеристики и прогнозируется существенное повышение водородостойкости.

Список литературы

1. Ткачев В. И., Холодный В. И., Левина И. Н.. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. Львов: Вертикаль, 1999.
2. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1978.
3. Андрейкив А. Е., Панасюк В. В., Ткачев В. И. Влияние водорода на работоспособность металлических материалов и конструкций. Научно-технический юбилейный сборник. Воронеж: ИПФ «Воронеж», 2001.
4. Мусатов М. И., Демчаков Г. Г., Кузин В. Ф., Астрединов М. И., Холодный В. И. Авторское свидетельство № 204322. Заготовка для изготовления детали типа крыльчатки.
5. Дмитренко А. И., Рачук В. С., Рудис М. А., Холодный В. И. Прочность колес водородных насосов высокого давления. Международный научно-технический журнал «Физико-химическая механика материалов». Львов. 2000, № 4.
6. Бондаренко Т. В., Дмитренко А. И., Холодный В. И. Горячее изостатическое прессование – современный метод обеспечения высоких технических характеристик изделий. Научно-технический юбилейный сборник. Воронеж: ИПФ «Воронеж», 2001.
7. Дмитренко А. И., Рачук В. С., Холодный В. И. Опыт применения газостатического прессования заготовок в турбонасосных агрегатах ЖРД. Научно-технический сборник «Новые технологические процессы и надежность ГТД». Вып. 2. М.: ЦИАМ, 2001.
8. Белогуров А. И., Рачук В. С., Рудис М. А., Сушков А. М., Холодный В. И. Расчет элементов конструкций водородной энергетики на прочность. Международный научно-технический журнал «Физико-химическая механика материалов». Львов. 2004, № 6.
9. Рачук В. С., Дмитренко А. И. Применение титановых сплавов в жидкостных ракетных двигателях. Научно-технический журнал «Двигатель». 2009, № 3.