

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МАЛЫМИ ДОЗАМИ ГАММА-КВАНТОВ

Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П.

Приведены результаты исследований влияния радиационного облучения малыми дозами гамма-квантов на износостойкость алмазного породоразрушающего инструмента. Установлена оптимальная величина дозы облучения и мощности поглощённой дозы, обеспечивающих максимальный ресурс алмазных коронок. Сформулирована версия механизма упрочнения композиционных алмазосодержащих материалов при облучении малыми дозами гамма-квантов.

Повышение прочностных характеристик композиционных алмазосодержащих материалов (КАМ) является важным направлением увеличения эффективности работ, выполняемых с использованием алмазного инструмента. Перспективным в этом направлении является разработанный нами способ упрочнения алмазного инструмента [1], основанный на ионизирующем облучении гамма-квантами источника 60°C или гамма-контур атомного реактора. При этом облучение осуществляется поглощенной дозой $(2-8)10^3\text{P}$ при мощности поглощённой дозы $1,4 - 2,0 \text{ P/c}$. Сравнительные испытания в производственных условиях алмазных коронок показали, что проходка на коронку, упрочненную по данному способу, увеличивается в $1,2 - 2,5$ раза [2, 3].

Положительные результаты сравнительных испытаний алмазных коронок, облученных малыми дозами гамма-квантов, позволили приступить к планомерным исследованиям по выяснению механизма упрочнения алмазного ПРИ, поиску оптимальных режимов облучения, определению рациональной области применения разработанного способа. Исследования проводились с использованием методов радиографического декорирования, структурного полирования, химического травления, металлографии, электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, акустической эмиссии. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также известные положения из физики твердого тела, позволили сформулировать некоторые представления о механизме упрочнения КАМ при облучении малыми дозами гамма-квантов.

В композиционном алмазосодержащем материале, входящем в состав рабочего инструмента, зерна алмазов равномерно распределены по поверхности или внутри матрицы, представляющей собой твёрдый сплав. Для повышения стойкости инструмента прежде всего необходимо увеличить прочность закрепления зёрен алмазов в твёрдом сплаве. Выполненные нами исследования показали, что облучение алмазных зёрен поглощённой дозой гамма-квантов от $2 \cdot 10^3\text{P}$ до $7,2 \cdot 10^5\text{P}$ при мощности поглощенной дозы $1,4 - 2,0 \text{ P/c}$ не приводит к улучшению их физико-механических характеристик, в частности к повышению предела прочности при раздавливании. В то же время физико-механические свойства твёрдого сплава, а также свойства границы раздела "зерно алмаза - твёрдый сплав" значительно изменяются. При этом наблюдаются два конкурирующих процесса. С одной стороны, при малых поглощенных дозах гамма-квантов происходит уменьшение дефектности в структуре твёрдого сплава, особенно на границе раздела "зерно алмаза - твердый сплав". С другой стороны, при больших поглощённых дозах гамма-квантов ухудшаются свойства как твёрдого сплава, так и границы раздела зёрен в результате введения радиационных дефектов.

Известно, что граница раздела отдельных зёрен почти во всех материалах является наиболее слабым местом, так как она является стоком дефектов, здесь же наблюдается максимальная концентрация полей напряжений. Такое состояние особенно характерно для материалов, сложенных из компонентов, сильно отличающихся физико-химическими свойствами, к которым относятся и КАМ. Здесь картина усугубляется ещё и низкими адгезионными свойствами алмазов. Всё это затрудняет создание КАМ с надёжным закреплением алмазных зёрен. Решение проблемы надёжного удержания алмазных зёрен в материале матрицы длительное время является исключительно важным направлением исследований при создании рабочего инструмента. В значительной степени решить эту проблему позволяет облучение

КАМ малыми дозами гамма квантов, которое позволяет существенно снизить уровень дефектов как в кристаллической структуре зёрен, так и на границе их раздела.

Ионизирующее излучение является перспективным направлением при создании новых технологических процессов, материалов, изделий, методов качественного и количественного анализа строения и характеристик вещества. Такие особенности ионизирующих излучений, как возможность концентрации большой энергии в малом объёме, высокая направленность, значительная проникающая способность, открывают огромные возможности для эффективного воздействия на материалы с целью направленного изменения их свойств.

Положительные результаты, полученные при облучении полупроводниковых кристаллов и металлорежущего инструмента, явились основанием для проведения исследований влияния ионизирующего излучения на износостойкость различного породоразрушающего инструмента (твёрдосплавного, алмазного, шарошечного). Способ радиационного упрочнения алмазного ПРИ путём облучения малыми дозами гамма-квантов или электронов впервые был предложен в ТПУ [1]. В основу способа положен эффект упорядочения структуры несовершенных кристаллов малыми дозами гамма-квантов или электронов (эффект малых доз ионизирующего излучения), обнаруженный также в ТПУ [4]. Принципиально новым здесь является то, что слабое воздействие ионизирующего излучения вызывает коренную перестройку кристаллов и резкое улучшение его физических свойств. Структурные изменения в твёрдом кристаллическом теле осуществляются за счёт освобождения запасённой энергии в результате инициированных облучением цепных реакций между дефектами, то есть облучение малыми дозами гамма-квантов дефектных полупроводниковых или металлических кристаллов приводит не к накоплению дефектов, а наоборот, к их устранению.

Значительную роль в устранении дефектов при малых поглощённых дозах гамма-квантов играет водород, содержание которого в твёрдом сплаве составляет 10^{20} - 10^{21} атомов/см³ [5]. При облучении КАМ гамма-квантами содержащийся в твёрдом сплаве водород ионизируется и переходит из молекулярного состояния в атомарное состояние H⁺. Положительно заряженный атомарный водород в твёрдом теле отличается исключительно высокой активностью. При своём движении он взаимодействует с междоузельными атомами твёрдого тела, находящимися в метастабильном состоянии. При взаимодействии с ионизированным атомарным водородом междоузельные метастабильные атомы получают энергию, достаточную для преодоления барьера аннигиляции и либо аннигилируют с вакансиями, являющимися "стопорами" дислокации, либо мигрируют к стокам, в качестве которых выступают границы раздела алмазного зерна и твёрдого сплава. При аннигиляции вакансий дислокации снимаются со "стопоров" и занимают наиболее выгодные в энергетическом отношении положения, то есть происходит перестройка дислокаций. Поскольку максимальное количество дислокаций расположено на границе раздела "зерно алмаза - твёрдый сплав", то перестройка дислокаций на границе раздела приводит к устранению мелких пор в этой области. Кроме того, освобождённые в результате взаимодействия с ионизированным атомарным водородом междоузельные метастабильные атомы кобальтовой или иной другой связи твёрдого сплава диффундируют в зёрна алмазов за счёт резкого увеличения коэффициента диффузии материала связи.

Устранение пор на границе раздела твёрдого сплава и алмазных зёрен, диффузия метастабильных атомов в алмазы способствуют более прочному закреплению зерен алмазов в твёрдосплавной матрице. Всё это приводит к повышению абразивной стойкости рабочего инструмента и увеличению его ресурса.

Однако ионизированный атомарный водород при его концентрации в твёрдом теле, превышающем 10^{10} атомов/см³, аномально быстро уходит из твёрдого тела [5], не успевая провзаимодействовать с достаточно большим количеством метастабильных атомов, что снижает эффективность радиационной обработки КАМ. Для повышения эффективности радиационной обработки необходимо создавать в КАМ такую концентрацию ионизированных атомов водорода, при которой он не уходит из твёрдого тела, а длительное время обрабатывает междоузельные метастабильные атомы. Это достигается уменьшением мощности поглощённой дозы гамма-квантов и, соответственно, увеличением времени облучения. Поглощённая доза гамма-квантов при этом должна быть достаточной для того, чтобы прошла перестройка всех метастабильных междоузельных атомов.

Исследования показали, что оптимальный диапазон поглощённых доз гамма-квантов для эффективного упрочнения алмазного породоразрушающего инструмента находится в ди-

апазоне $2 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3$ Р. Он обусловлен тем, что при поглощенных дозах, меньших $2 \cdot 10^3$ Р, процессы радиационной перестройки в твёрдом сплаве и на границе раздела " алмазное зерно – твёрдый сплав" не успевают полностью завершиться, а при поглощенных дозах, больших $8 \cdot 10^3$ Р, концентрация вводимых при облучении радиационных дефектов настолько велика, что приводит к повышенной хрупкости КАМ и ухудшению его физико-механических свойств.

Диапазон мощности поглощенных доз гамма-квантов (1,4 – 2,0) Р/с обусловлен тем, что при мощности поглощённой дозы, меньшей 1,4 Р/с, требуется длительное время облучения, что экономически нецелесообразно, а при мощности поглощенной дозы, большей 2,0 Р/с, количество образующегося в единицу времени ионизированного атомарного водорода таково, что он уходит из инструмента, не производя требуемой перестройки междоузельных метастабильных атомов.

Проверка данных представлений о механизме упрочнения КАМ при ионизирующем облучении гамма-квантами осуществлялась при испытании алмазных коронок типа К-01-1 и 01АЗД60К40. Бурение скважин облученными и базовыми коронками проводилось в горных породах, представленных порфиритами IX категории по буримости при оптимальных фиксированных режимных параметрах: для коронок типа К-01-1 осевая нагрузка – 1200 кГс, частота вращения – 460 об/мин, расход промывочной жидкости (вода) – 60 л/мин; для коронок 01АЗД60К40 - осевая нагрузка – 1000 кГс, частота вращения снаряда – 460 об/мин, расход промывочной жидкости – 50 л/мин.

По результатам сравнительных испытаний коронок К-01-1 определялся показатель "проходка на коронку". Результаты испытаний по этому показателю приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний алмазных коронок К-01-1

Вид алмазных коронок	Поглощённая доза, Р	Мощность поглощённой дозы, Р/с	Проходка на коронку, м
К-01-1, облученные гамма-квантами	$8 \cdot 10^2$	1,2	15,63
		1,4	15,64
		1,7	15,64
		2,0	15,62
		2,2	15,64
	$2 \cdot 10^3$	1,2	20,15
		1,4	21,48
		1,7	20,98
		2,0	20,74
		2,2	18,38
	$5 \cdot 10^3$	1,2	31,39
		1,4	31,40
		1,7	29,40
		2,0	28,34
		2,2	21,32
	$8 \cdot 10^3$	1,2	25,24
		1,4	25,72
		1,7	25,51
		2,0	22,64
		2,2	17,51
	$1 \cdot 10^4$	1,2	12,84
		1,4	12,75
		1,7	12,93
		2,0	12,79
		2,2	12,97
К-01-1, базовые коронки	-	-	15,64

Для проведения испытаний было подготовлено 6 партий коронок по 5 коронок в каждой партии. Одна партия была принята за базовую, остальные были облучены малыми дозами гамма-квантов в диапазоне поглощённой дозы от $8 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^4$ Р и мощности поглощённой дозы (1,2 – 2,2) Р/с.

Из табл. 1 видно, что при одних и тех же геолого-технических условиях и режимах бурения проходка на коронку изменяется в широком диапазоне – от 8,75 до 31,4 м в зависимости от дозы и мощности поглощённой дозы. Максимальную проходку имеют коронки, облученные дозой $5 \cdot 10^3$ Р. Отклонение дозы в ту или другую сторону приводит к снижению эффекта. Проходка на коронку вначале незначительно, а затем резко снижается.

Приведенные результаты испытаний хорошо согласуются с выводами о существовании оптимального диапазона облучения КАМ поглощённой дозой гамма-квантов равной $(2-8) \cdot 10^3$ Р при мощности поглощённой дозы 1,4 – 2,0 Р/с, обеспечивающего максимальную эффективность упрочнения алмазного ПРИ.

Испытания коронок 01АЗД60К40 проводились с целью получения количественной оценки влияния облучения гамма-квантами на надёжность (качество) закрепления алмазных зёрен в матрице по показателям "сохранность алмазов" и "удельный расход алмазов". Для проведения этих испытаний было подготовлено 4 партии коронок (по 3 коронки в каждой партии). Одна партия оставалась контрольной, а остальные были облучены малыми дозами гамма-квантов при различных режимах (дозы облучения - $8 \cdot 10^2$ Р; $5 \cdot 10^3$ Р; $1 \cdot 10^4$ Р; мощность поглощённой дозы - 1,5 Р/с). Перед началом и после испытаний в каждой коронке считались все алмазные зёрна. Определение числа алмазов производилось с помощью бинокулярной лупы ЛУ-2. Для удобства подсчёта алмазных зёрен перед началом эксперимента матрица коронки подвергалась незначительной электрохимической обработке в растворе NaCl с целью поверхностного обнажения алмазов.

Каждая коронка 01АЗД60К40 обрабатывалась в два рейса по 3 м. После второго рейса производился контрольный подсчёт алмазов. Результаты исследований, выполненных по данной методике, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний алмазных коронок 01АЗД60К40

Тип коронок	Доза облучения, Р	Количество алмазных зёрен в коронке, шт:		Удельный расход алмазов при проходке 6 м, шт/м	Сохранность алмазов, %	Полная проходка на коронку, м
		до испытаний	после испытаний			
01АЗД60К40, облученные гамма-квантами	$8 \cdot 10^2$	360	223	22,8	62	8,1
	$5 \cdot 10^3$	359	283	12,6	79	12,8
	$1 \cdot 10^4$	357	207	25,0	58	7,6
01АЗД60К40, контрольные	-	362	217	24,0	60	7,9

Результаты испытаний, приведенные в табл.2, свидетельствуют о том, что минимальный удельный расход алмазов имеет место при оптимальной дозе облучения $5 \cdot 10^3$ Р. Он почти в 2 раза меньше, чем у контрольных коронок и у коронок, облученных дозой $8 \cdot 10^2$ и $1 \cdot 10^4$ Р. После проходки 6 м в контрольных коронках сохранилось 60% алмазов, в то время как в коронках, облученных гамма-квантами дозой $5 \cdot 10^3$ Р, сохранилось 79% алмазов.

По существующим нормам отработки алмазных коронок минимально допустимая сохранность алмазов, после которой коронки снимают с эксплуатации и отправляются на рекуперацию, должна быть не менее 55%. Поэтому все участвующие в эксперименте коронки были направлены для окончательной отработки, при которой износ по геометрическим параметрам достигал предельного значения. Полная проходка на коронку, облученную дозой $5 \cdot 10^3$ Р, составила 12,2 м, что в 1,5-1,6 раза больше, чем у всех остальных коронок.

Увеличение проходки на коронку можно объяснить высокой сохранностью алмазов,

обусловленной, главным образом, более качественным закреплением алмазных зёрен в матрице при облучении гамма-квантами. Матрица коронки надёжнее удерживает алмазные зёрна в процессе разрушения горной породы, что приводит к увеличению их работоспособного периода, а, следовательно, и ресурса коронки в целом.

Как было показано выше, существенную роль в устранении дефектов в твёрдом сплаве и КАМ при облучении малыми поглощёнными дозами гамма-квантов играет водород, содержание которого составляет до 10^{20} - 10^{21} атомов/см³. Механизм воздействия водорода на дефекты в твёрдом сплаве при облучении гамма-квантами говорит в пользу увеличения его концентрации. Представляло интерес исследование влияния водорода на прочностные характеристики твёрдого сплава (в частности на его износостойкость) при искусственном увеличении его содержания и последующем облучении гамма-квантами.

В качестве объекта для исследований использовались резцы формы Г-57 из твёрдого сплава ВК8 и Т15К6. Водород в резцы из твёрдого сплава вводился электролитическим способом из раствора серной кислоты при плотности тока 10 мА/см² в течение 30 минут. Контроль за содержанием водорода осуществлялся взвешиванием образцов на прецизионных весах с точностью 0,0001 г. Количество введенных дефектов оценивалось измерением электрического сопротивления образцов. Облучение проводилось на облучательной установке "Исследователь" интегральным потоком гамма-квантов $1 \cdot 10^5$ Р. После облучения резцы монтировались в короночные кольца диаметром 44 мм и фиксировались при помощи кернения. В каждой коронке устанавливалось по 5 резцов. Для исследований было подготовлено по 4 коронки с базовыми и опытными резцами. Таким образом, в сравнительных испытаниях каждой марки твёрдого сплава участвовало по 20 резцов каждого вида. За базу сравнения были взяты резцы из твёрдого сплава, облученные гамма-квантами дозой $1 \cdot 10^5$ Р без предварительного насыщения водородом.

Бурение скважин проводилось на буровом стенде в блоках кварцевого диорита (IX категория по буримости) при частоте вращения коронок 155 об/мин, интенсивности промывки скважин 7 л/мин и осевой нагрузке на резец 20 кГс. До и после бурения резцы взвешивались с точностью 0,0001 г. Абразивный износ определялся по потере массы. Забурка скважин производилась на шлифованной поверхности горной породы. Глубина скважин составляла 10 мм. Замер глубины скважин осуществлялся с помощью штангенциркуля с точностью 0,1 мм. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследований износостойкости твёрдых сплавов ВК8 и Т15К6
при введении в них водорода

Марка твёрдого сплава	Средний износ резцов, Г	Удельный износ резцов, г/мм	Улучшение показателя, %
ВК8			
Опытные резцы	0,0191	0,0012	29,4
Базовые резцы	0,0231	0,0017	
Т15К6			
Опытные резцы	0,0195	0,0013	31,6
Базовые резцы	0,0245	0,0019	

Из табл. 3 видно, что предварительное насыщение твёрдого сплава водородом и облучение гамма-квантами заметно повышает износостойкость резцов при абразивном износе по сравнению с базовыми резцами. Так, удельный износ резцов из твёрдого сплава ВК8 и Т15К6 снизился соответственно на 29,4% и 31,6%.

Полученные результаты исследований явились основой для разработки способа упрочнения твёрдосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента, защищённого патентом [5].

Механизм упрочнения твёрдого сплава и КАМ по данному способу по мнению авторов выглядит следующим образом. При введении в объём твёрдого сплава атомов водорода они накапливаются в порах, трещинах, на границах зёрен, вызывая дополнительные напряжения. При облучении атомы водорода ионизируются, что приводит к резкому усилению их коэффициента диффузии. Сечение взаимодействия гамма-квантов с атомами водорода составляет ко-

лоссальную величину (~ 10-16 см²), в результате чего происходит возбуждение водородной атмосферы, энергия которой передаётся ядерной подсистеме твёрдого сплава и его структура самоорганизуется. Однако для протекания процессов самоорганизации необходима большая плотность дефектов, которая и создаётся предварительным введением атомов водорода. При облучении твёрдого сплава или КАМ малыми дозами гамма-квантов в нём протекают цепные процессы аннигиляции дефектов, структура твёрдого сплава при этом переходит в более равновесное состояние по сравнению с исходным состоянием, повышаются адгезионные свойства зёрен. Выполняя полезную работу при выходе из образца, водород уменьшает количество трещин, пор, повышает пластичность, увеличивает эксплуатационную стойкость. Всё это в конечном итоге приводит к улучшению физико-механических характеристик твёрдого сплава и повышению работоспособности инструмента.

Особенно перспективным данное направление работы может оказаться при разработке технологии изготовления алмазного ПРИ, где повышение удерживающей способности матрицы по отношению к алмазным зёрнам имеет исключительно важное значение, так как оно является одним из главных факторов, определяющих качество композиционных алмазосодержащих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2101456 РФ на изобретение "Способ упрочнения твёрдосплавного и алмазного инструмента для бурения горных пород" /Рябчиков С. Я., Мамонтов А. П.- - 1998. – Бюл. № 1.
2. Р я б ч и к о в С. Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента различными физическими способами // Техн. и технол. геол.-развед. работ (ВИЭМС).- 1993..- Вып. 1.- 37 с.
3. Р я б ч и к о в С. Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента. М.: ВИНТИ.- 1998.-80 с.
4. Ч е р н о в И. П., М а м о н т о в А. П., Б а т а к и А. А. Аномальное воздействие малых доз ионизирующего излучения на металлы и сплавы / Атомная энергия.- 1984.- Том 57, вып. 1.- С.56-58.
5. Патент № 2092282 РФ на изобретение «Способ упрочнения твёрдосплавного инструмента» /Рябчиков С.Я., Мамонтов А.П. Чернов И.П. – 1997. – Бюл. № 28

УДК 622.244.442.063

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПРОМЫВочНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Чубик П.С.

Начало исследованиям промывочных жидкостей в стенах ТПУ было положено автором в 1976 году. За прошедшую четверть века по этой тематике опубликовано более 100 работ, в том числе монография «Квалиметрия буровых промывочных жидкостей», 3 брошюры и 3 учебных пособия; получен десяток патентов на изобретения и выполнено такое же число хозяйственных и госбюджетных НИР; сделано более двадцати докладов на Международных, Всесоюзных и Всероссийских научных конференциях; защищена кандидатская (1987) и докторская (2000) диссертации; появились свои аспиранты и ученики – кандидаты наук (Годунов Е.Б., 1996). Все это вместе взятое принесло ТПУ определенную известность и в этой области научных исследований.

В данной статье рассматриваются основные результаты исследований промывочных жидкостей, полученные в последние годы.

Характерной чертой буровых работ является высокая капиталоемкость. В этой связи повышение их эффективности всегда было и сегодня остается весьма актуальной задачей.

Собственно бурение скважин заключается в разрушении горных пород на забое, удалении продуктов разрушения с забоя на поверхность, спуске и подъеме бурового снаряда. Самый распространенный способ удаления продуктов разрушения - гидравлический, который