

Зависимость производительности технологических линий уничтожения боеприпасов сложной конструкции от прочностных характеристик локализатора

© 2016. А. Ю. Кармишин¹, к. т. н., доцент, начальник НИЦ, Т. В. Воробьёв¹, к. х. н.,
доцент, начальник управления, И. Н. Исаев¹, к. х. н., начальник отдела,
И. В. Коваленко¹, к. т. н., доцент, с. н. с., А. В. Мандыч¹, зам. начальника отдела,
В. С. Юсупов², д. т. н., заведующий лабораторией,
В. Ф. Чопоров², к. т. н., с. н. с.,

¹ Научно-исследовательский центр Федерального управления
по безопасному хранению и уничтожению химического оружия,
115487, Россия, г. Москва, ул. Садовники, д. 4 а,

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49,
e-mail: fubhuho@mail.ru, choporo5@yandex.ru

Одним из способов безопасной утилизации обычных боеприпасов может являться промышленная технология уничтожения химических боеприпасов сложной конструкции. Разработанные камера уничтожения и агрегат расснаряжения являются основными элементами в составе созданной технологической линии разборки и уничтожения на объектах по уничтожению химического оружия в пос. Леонидовка, пос. Мирный и г. Щучье.

Длительный ресурс работы и производительность камеры уничтожения зависит от надёжной и безопасной работы основных элементов, входящих в её состав, а именно локализатора, отбойника с его составляющими.

Основной быстроизнашивающейся деталью камеры уничтожения является локализатор, требующий периодического осмотра с целью установления видимых дефектов на его внутренней поверхности, с дальнейшей заменой этого элемента. Возможно исчерпание ресурса работоспособности локализатора и за счёт невидимых изменений свойств металла.

Исследованы механические свойства металла и структура толщины стенки локализатора после различного количества подрывов. Выявлено, что структура стали практически не изменяется в зависимости от числа подрывов. Материал локализатора (сталь 15ХМ) сохранил ресурс работоспособности после 10000 подрывов, что позволяет сделать вывод о соответствующей возможности увеличения ресурса локализатора.

Результаты проведенных исследований по изучению прочностных характеристик локализатора позволили существенным образом повысить производительность технологической линии разборки и уничтожения, тем самым сократив сроки уничтожения боеприпасов сложной конструкции.

Ключевые слова: идентификация, уничтожение химического оружия, отравляющее вещество, реакционная масса, анализ.

Dependence of performance of production lines of complex design ammunition destruction on strength characteristics of the localizer

A. Yu. Karmishin¹, T. V. Vorobyev¹, I. N. Isayev¹, I. V. Kovalenko¹,
A. V. Mandych¹, V. S. Yusupov², V. F. Choporov²,

¹ Research and development center of the Federal Directorate
for Safe Storage and Destruction of Chemical Weapons,
4 a St. Sadovniki, Moscow, Russia, 115487,

² A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials,
Russian Academy of Sciences,
49 Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119991,
e-mail: fubhuho@mail.ru, choporo5@yandex.ru

line of destruction and destruction at chemical weapons destruction facilities in the settlement Leonidovka, the settlement Mirnyy and in the town Shchuchye.

Long service life and efficiency of the destruction chamber is dependable on safe operating of its main elements, of the localizer, chipper with its components in particular.

The most short-lasting detail of the destruction chamber is the localizer that requires control from time to time in order to find any defects on its inner surface and if there are any, the inner surface should be changed. When metal properties slightly change, the localizer gets out-of-date.

Mechanical properties of the metal and the structure of the wall thickness of localizer after its blasting are studied. It is stated that steel structure does not change no matter how many times blasting took place. The operational life of the localizer material (steel 15XM) is going on after 10000 blastings, thus it is possible to suggest that the localizer's service life could be prolonged.

The results of the research of strength characteristics of the localizer allowed to increase the efficiency of the technological line of destruction and destruction and to shorten the time of complex design munitions destruction.

Keywords: identification, chemical weapons destruction, poison substance, reaction mass, analysis.

Одним из способов безопасной утилизации боеприпасов может являться промышленная технология уничтожения химических боеприпасов сложной конструкции (БСК), реализованная на объектах по уничтожению химического оружия в пос. Леонидовка, пос. Мирный и г. Щучье.

В результате разработки этой технологии были созданы камера уничтожения (КУ) с встроенным внутри индукционным нагревателем и агрегат расснаряжения (АР), содержащий камеру расснаряжения со сверлильным устройством для вскрытия корпуса боеприпаса сверлением, удаления из него ОВ в ванну с реакционной массой и транспортные механизмы для передачи расснаряжённого боевого элемента в камеру уничтожения.

Разработанные камера уничтожения и агрегат расснаряжения являются основными элементами в составе созданной технологической линии разборки и уничтожения (ТЛ РУ).

На объектах по уничтожению химического оружия данная технология была реализована в специально возведённых промышленных корпусах во взрывозащитном исполнении, с соблюдением всех требований пожаро- и взрывобезопасности, что позволило обеспечить безопасность работающего персонала, инфраструктуры объектов и окружающей среды.

Уничтожение БСК происходит под воздействием высокой температуры (400–450 °С), которая создаётся в локализаторе. Нагрев и поддержание температуры локализатора осуществляется индукционным нагревателем. Для предотвращения разлёта осколков при уничтожении элементов БСК и повреждения внутренних частей камеры, внутренний проём локализатора перекрывается отбойником, торцевые стенки которого защищены шиберами.

Таким образом, длительный ресурс работы и производительность КУ зависит от надёжной и безопасной работы основных элементов, входящих в её состав, а именно локализатора, отбойника с его составляющими: шибера и нагревателя.

В связи с этим возникала необходимость в выполнении мероприятий по разработке конструктивных, технических и технологических решений, обеспечивающих стабильную работу КУ, увеличение её ресурса и производительности. Основой этих мероприятий являлись результаты пусконаладочных работ, начального этапа эксплуатации ТЛ РУ, сопоставительного анализа работы оборудования КУ и исследования прочностных характеристик материала локализатора после различного количества рабочих циклов нагружения при подрывах.

Основной быстроизнашивающейся деталью КУ является локализатор, требующий периодического осмотра с целью установления видимых дефектов на его внутренней поверхности с дальнейшей заменой этого элемента. Возможно исчерпание ресурса работоспособности локализатора и за счёт невидимых изменений свойств металла.

Локализатор представляет собой цельную толстостенную трубу с наружным диаметром 402 мм и толщиной стенки 75 мм из стали 15XM (по ГОСТ 8731-74), предназначен для размещения элементов БСК и локализации последствия взрыва.

При многократном подрыве элемента БСК в локализаторе вследствие сильного контактного (бризантного) действия взрыва в зоне подрыва (внутренняя нижняя часть полусферической поверхности локализатора) появляется углубление в виде воронки, образование которой происходит в связи с «размыванием» металла. Глубина углубления (воронки)

представляет опасность для работы устройства уничтожения, а также является препятствием для удаления осколков ранее подорванных элементов БСК и для позиционирования очередного элемента для подрыва. Вследствие этого периодически возникала необходимость исследовать прочностные характеристики материала локализатора после различного количества рабочих циклов нагружения при подрывах.

Исследования прочностных характеристик проводились на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН).

Образцы для исследования изготавливались из материала вырезанного сегмента локализатора (участка, подвергнутого наибольшей взрывной нагрузке), извлеченного из камер уничтожения модернизированных после достижения 996, 1443, 2448, 4060 и 5455 подрывов с верхнего, среднего и нижнего уровня сегмента.

Целью работы являлось исследование механических свойств металла локализатора после различного количества подрывов.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- проведение испытания материала локализатора на растяжение (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение) в зависимости от числа подрывов;
- проведение исследования микроструктуры материала локализатора в зависимости от числа подрывов;
- проведение испытания материала локализатора на ударную вязкость в зависимости от числа подрывов.

Прочность стали типа 15ХМ оценивали по пределу текучести и пределу прочности при растяжении, запас пластичности – по относительному удлинению при растяжении, работу разрушения – по ударной вязкости.

С помощью оптической микроскопии исследована структура толщины стенки локализатора в зависимости от числа подрывов. Выявлено, что структура стали практически не изменяется в зависимости от числа подрывов.

К основным механическим свойствам металлов относятся:

- прочность – сопротивление материала деформации и разрушению;
- упругость – способность материала восстанавливать свою форму и объём после

прекращения действия внешних сил или других причин, вызвавших деформацию;

- пластичность – способность материала под действием внешних сил изменять, не разрушаясь, свою форму и размеры и сохранять остаточные деформации после устранения этих сил;

- твёрдость – сопротивление материала местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твёрдого тела, например, наконечника (индентора);

- вязкость – способность материала сопротивляться действию ударных нагрузок.

Первое требование, предъявляемое к большинству изделий – это достаточная прочность как свойство материала не разрушаться с течением времени под действием изменяющихся рабочих нагрузок.

Учитывая характер работы локализатора – малоцикловое ударное нагружение, можно сделать вывод, что важными механическими свойствами, определяющими стойкость локализатора, являются статическая прочность и пластичность, ударная вязкость. Механические свойства определяются по результатам механических испытаний. В качестве характеристики прочности используем предел прочности и предел текучести, в качестве характеристики пластичности – относительное удлинение образцов при растяжении. Вязкость оценивали по ударной вязкости, характеризующей работу разрушения.

Заготовки под образцы вырезали из стенки локализатора, которая испытывает наибольшие нагрузки, создаваемые циклическими подрывами в непосредственной близости от места вымывания металла подрывами.

Всего было получено по 6 образцов от пяти локализаторов, после 996, 1443, 2448, 4060 и 5455 подрывов.

а) Результаты испытаний на растяжение

Испытания проводили на разрывной машине по ГОСТ 1497-84. На рисунке 1 приведена типовая машинная диаграмма записи изменения усилия растяжения в зависимости от удлинения для образца № 4-1.

На основании индикаторной кривой «нагрузка – удлинение» строится кривая в координатах «напряжение – относительная деформация», по которой определяются характеристики прочности и пластичности: предел текучести σ_T (МПа), предел прочности σ_B (МПа) и относительное удлинение до разру-

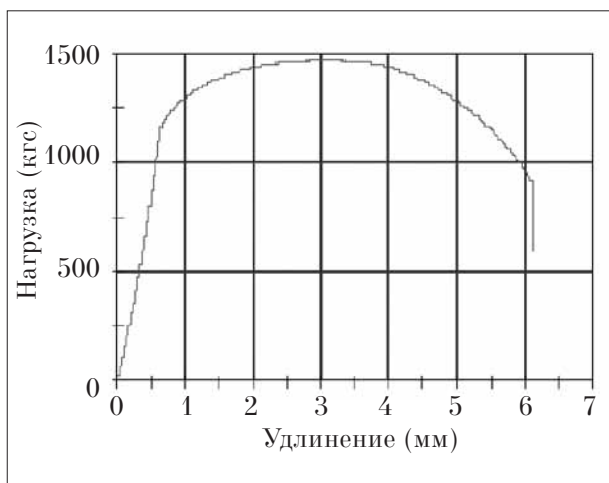


Рис. 1. Типичная кривая растяжения «нагрузка – удлинение» на примере образца № 4-1

шения δ (%), показанные на рисунке 2. При испытаниях эти характеристики определялись автоматически. Результаты испытания на растяжение приведены в таблице 1.

Сравнение результатов испытания на растяжение в зависимости от количества подрывов приведены на рисунке 4.

Из таблицы 1 и рисунка 2 следует, что механические свойства незначительно изменяются в зависимости от числа подрывов. Прочностные и пластические свойства после каждого фиксированного числа подрывов близки на внутреннем, среднем и наружном слое локализатора. На всех образцах внутренний слой имеет чуть большую прочность и меньшую пластичность, что, по-видимому, связано с технологией изготовления толсто-

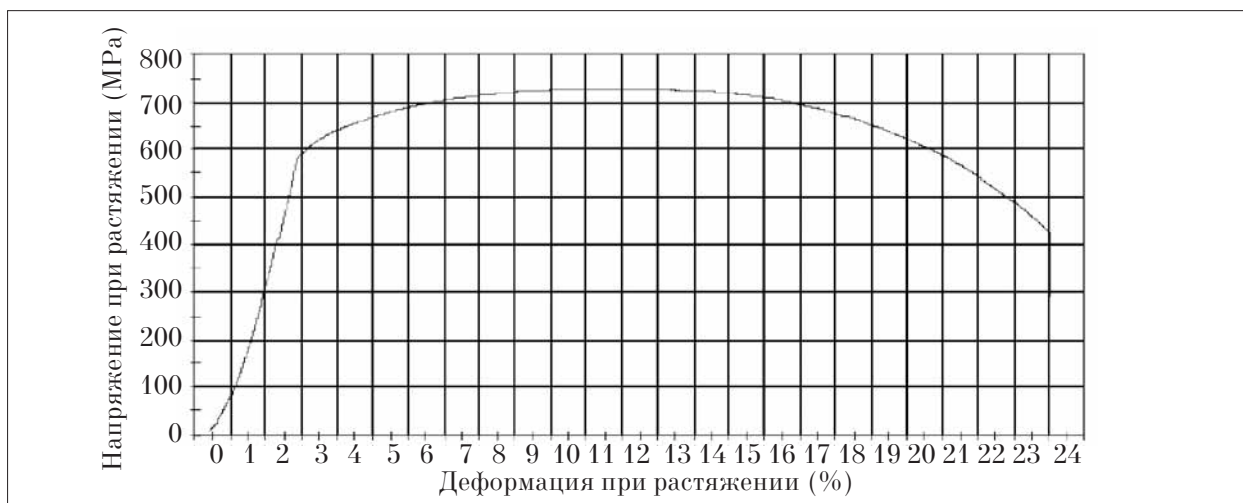


Рис. 2. Диаграмма растяжения образца № 4-1 в координатах «напряжение – деформация»

Таблица 1

Результаты испытания на растяжение материала (стали 15ХМ) локализатора в зависимости от количества подрывов

№	Относительное удлинение, δ , %	Предел текучести, σ_r , МПа	Предел прочности, σ_b , МПа	Количество подрывов	Слой
1-1	18,83	639	723	996	внутренний
1-2	21,18	605	706	996	средний
1-3	22,91	592	697	996	наружный
2-1	26,33	474	603	1433	внутренний
2-2	30,90	416	564	1433	средний
2-3	25,61	462	587	1433	наружный
3-1	22,06	618	745	2443	внутренний
3-2	23,76	524	683	2443	средний
3-3	25,98	570	725	2443	наружный
4-1	21,43	600	729	4060	внутренний
4-2	20,99	529	691	4060	средний
4-3	18,16	605	724	4060	наружный
5-1	21,66	520	653	5455	внутренний
5-2	25,00	429	594	5455	средний
5-3	23,11	482	633	5455	наружный

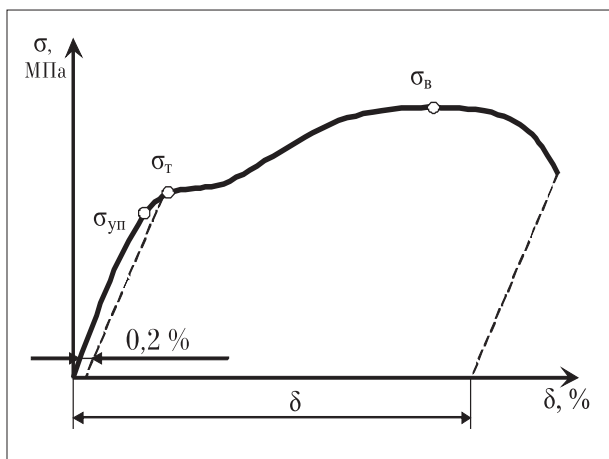


Рис. 3. Диаграмма растяжения в координатах «напряжение – деформация»: σ_t – предел текучести, σ_b – предел прочности, δ – относительное удлинение до разрушения

стенной трубы и прокаливается стали 15ХМ.

Провалов прочности и пластичности не наблюдалось ни на одном образце, что косвенно подтверждает отсутствие внутренних

трещин в металле после эксплуатации. Испытание на растяжение весьма чувствительно к наличию трещин и других дефектов.

Минимальные прочностные характеристики наблюдались после 1433 подрывов: средний по толщине локализатора предел текучести составляет 451 МПа и предел прочности – 585 МПа соответственно. Максимальные прочностные характеристики зафиксированы после 996 подрывов: средний предел текучести 612 МПа и средний предел прочности 709 МПа. Весьма близкие показатели к максимальной прочности получены на образцах после 2443 подрывов: $\sigma_t = 571$ МПа, $\sigma_b = 718$ МПа, и после 4060 подрывов: $\sigma_t = 578$ МПа, $\sigma_b = 715$ МПа. Несколько ниже средние показатели прочности после 1433 подрывов: $\sigma_t = 451$ МПа, $\sigma_b = 585$ МПа, и после 5455 подрывов: $\sigma_t = 477$ МПа, $\sigma_b = 627$ МПа. Однако такое снижение прочности вызвано не процессом эксплуатации, а флуктуацией состава стали и термообработкой. На это указывает то, что средняя пластичность после 1433 подрывов значительно выше и составляет $\delta = 27,6\%$, что

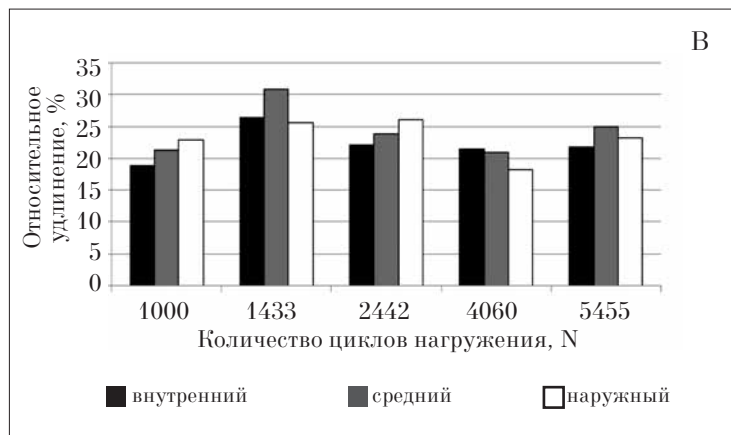
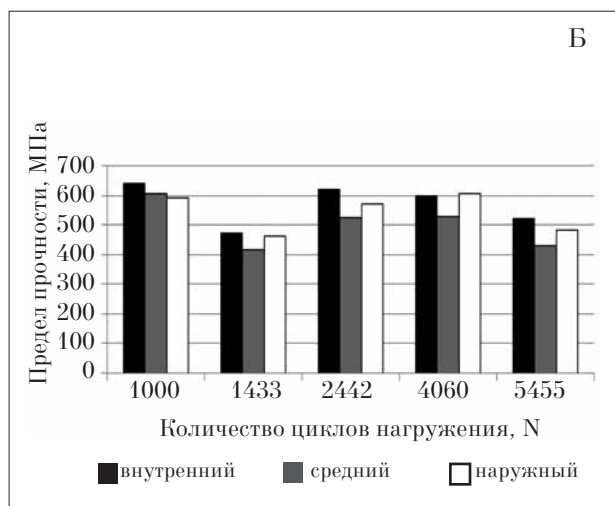
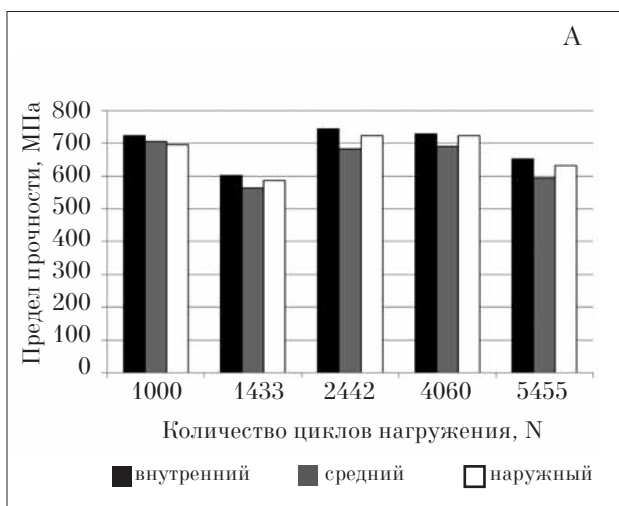


Рис. 4. Диаграмма сравнения предела прочности (А), предела текучести (Б) и относительного удлинения (В) в зависимости от числа подрывов

превышает на 10–13% пластичность стали после 1000 ($\delta = 21\%$) и 2443 ($\delta = 24\%$) подрывов. После 4060 и 5455 подрывов средний предел прочности составляет 715 и 627 МПа, что соответствует уровню предела прочности, полученному в предыдущих исследованиях (570–700 МПа). После 4060 подрывов средний предел текучести составляет 578 МПа, после 5455 подрывов – 477 МПа, при среднем относительном удлинении 20 и 23% соответственно. Таким образом, общее поглощение энергии при разрушении, которую для статических испытаний можно характеризовать $\delta \cdot \sigma_T$, остается постоянным:

$$(\delta \cdot \sigma_T)_{996} = 27 \times 451 = 12177 \text{ МПа}\cdot\%;$$

$$(\delta \cdot \sigma_T)_{1433} = 21 \times 616 = 12936 \text{ МПа}\cdot\%;$$

$$(\delta \cdot \sigma_T)_{2443} = 24 \times 571 = 13700 \text{ МПа}\cdot\%;$$

$$(\delta \cdot \sigma_T)_{4060} = 20 \times 578 = 11560 \text{ МПа}\cdot\%;$$

$$(\delta \cdot \sigma_T)_{5455} = 23 \times 477 = 10971 \text{ МПа}\cdot\%.$$

Мы видим, что после 5455 подрывов поглощение энергии до разрушения несколько ниже, чем в остальных случаях, но это не говорит о накоплении дефектов и деградации металла. Этот же вывод подтверждают испытания на ударную вязкость, которые характеризуют энергию до разрушения в динамических условиях.

б) Результаты испытаний на ударный изгиб

Для испытаний на ударный изгиб наибольшее распространение получили маятниковые копры. В данной работе испытания проводили на маятниковом копре RKP-450.

Маятниковый копер Roell Amsler RKP-450 фирмы Zwick, год выпуска 2003. Маятниковый копер предназначен для испытания материалов на их склонность к хрупкому разрушению посредством удара маятника копра по образцу, установленному на специальных опорах.

Потенциальная энергия копра 450 Дж с возможностью понижения до 300 Дж.

Копер снабжен ЭВМ, с помощью которой возможна регистрация динамической кривой деформации и разрушения (кривая «нагрузка / прогиб») и определение на данной кривой работы зарождение и распространение динамической трещины. Также благодаря этому, может быть реализована методика измерения динамической вязкости разрушения при испытании образцов с наведенной трещиной.

Основные требования к исходным компонентам, материалам или к обрабатываемым образцам для исследования. Для испытаний используются образцы с надрезом, размеры и острота которого регламентируется стандартом (ГОСТ 9454-78, ISO 148-1).

Скорость движения маятника в момент удара по образцу должна быть в пределах 4–7 м/с, что соответствует скорости деформации стандартных образцов порядка 10^2 1/с. Зная высоту подъема маятника до и после удара и его вес, можно подсчитать работу, затраченную на разрушение образца. На копре Roell Amsler RKP-450 эта работа определяется автоматически. Испытания проводили на образцах 10x10x55 мм с U-образным надрезом

Таблица 2
Результаты испытания на ударный изгиб материала (стали 15ХМ) локализатора в зависимости от количества подрывов

№	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²	Количество подрывов	Слой
1-1	158	996	внутренний
1-2	150	996	средний
1-3	156	996	наружный
2-1	218	1433	внутренний
2-2	221	1433	средний
2-3	230	1433	наружный
3-1	140	2443	внутренний
3-2	152	2443	средний
3-3	158	2443	наружный
4-4	154	4060	внутренний
4-5	176	4060	средний
4-6	150	4060	наружный
5-4	202	5455	внутренний
5-5	195	5455	средний
5-6	206	5455	наружный

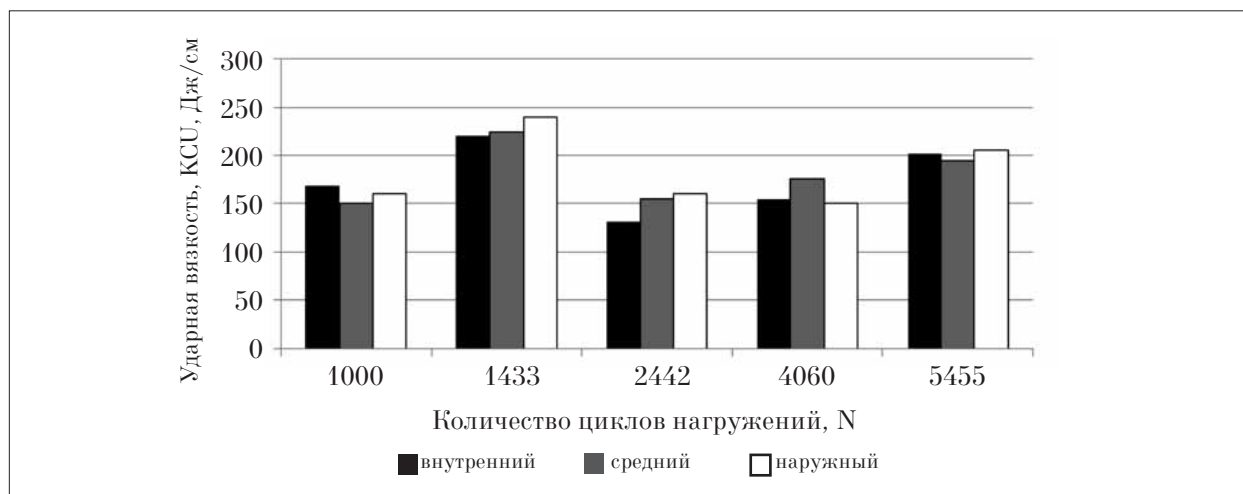


Рис. 5. Изменение ударной вязкости стали 15ХМ в зависимости от количества подрывов

в соответствии с ГОСТ 9454-78 Испытание на ударную вязкость.

Результаты проведенного исследования приведены в таблице 2. На рисунке 5 показана диаграмма полученных результатов в сравнении с ударной вязкостью образцов локализатора, полученных ранее после 1000–2500 циклов нагружения.

Анализ приведенных результатов испытания показывает, что ударная вязкость внутренних слоев анализатора при 996 подрывов составляет 158 Дж/см², среднего слоя – 150 Дж/см², а внешнего – 156 Дж/см². Дальнейшее повышение количества циклов нагружения до 1433, значение ударной вязкости повышается в среднем на 18–20%. При повышении количества циклов подрывов до 5455, значение ударной вязкости повышается до значений, полученных при 1433 подрывов.

в) Результаты измерения твёрдости.

Определение твёрдости на приборах типа ТБ осуществляется вдавливанием стального закаленного шарика (метод Бринелля) с опре-

делением твёрдости по величине поверхности оставляемого отпечатка (ГОСТ 9012-59). При измерении твёрдости металлов по Бринеллю стальной закаленный шарик диаметром D вдавливается в испытуемый образец или изделие под нагрузкой в течение определенного времени (рис. 6). В результате вдавливания шарика на поверхности образца получается отпечаток (лунка). Число твёрдости по Бринеллю, обозначаемое НВ, представляет собой отношение нагрузки P к площади поверхности сферического отпечатка F и измеряется в кгс/мм² или МПа.

Число твёрдости по Бринеллю определяется по формуле (1):

$$HВ = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Результаты проведенного исследования приведены на рисунке 7 и таблице 3.

Анализ данных приведенных на графике рисунка 7 и в таблице 3 показывает, что твёрдость изменяется в зависимости от количества циклов нагружения. Наибольшую твёрдость приобретает материал анализатора после 1000 и 2500 подрывов, она составляет 2209 НВ и 2496 НВ соответственно. Наименьшая твёрдость после 5455 подрывов, она составляет 1990 НВ [2–5]. При повышении количества подрывов до 10000, значение твёрдости повышается до значений, полученных при 4060 подрывах.

Отсутствие скачков твёрдости при измерениях в большую или меньшую сторону говорит об отсутствии наклепа и разрыхлений структуры металла.

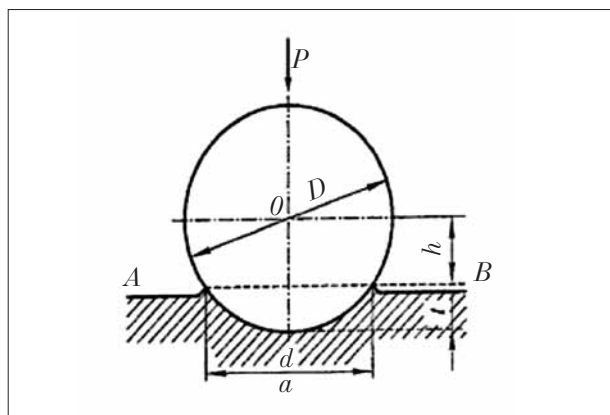


Рис. 6. Схема испытания на твёрдость по Бринеллю

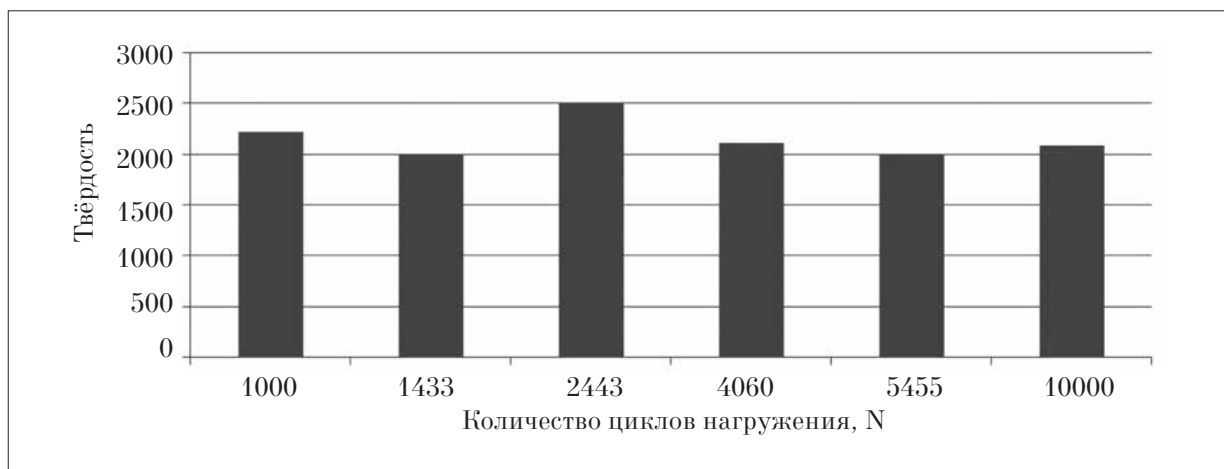


Рис. 7. Зависимость твёрдости стали 15XМ от количества циклов нагружения

Таблица 3

Твёрдость стали 15XМ после различного количества подрывов

№	Количество подрывов	Твёрдость, НВ
1	Исходный образец стали	2565
3	1000	2209
4	1433	1997
5	2443	2496
6	4060	2110
7	5455	1990
8	10000	2085

Нагреватель является источником электромагнитной энергии для нагрева локализатора в КУ. Нагреватель состоит из герметичного цилиндрического корпуса с центральным отверстием, внутри которого в несколько слоёв намотан жаростойкий кабель с минеральной изоляцией. Концы кабеля через сильфонный патрубок выведены из камеры в герметичный корпус и подключены к системе электропитания. При подрывах, вследствие многократного воздействия ударной волны, колебательного движения деформированного тела (локализатора), разлета высокоскоростных осколков, корпус нагревателя получает деформации и для поддержания его работоспособности необходимо проводить периодическую дефектацию.

Периодическая оценка состояния нагревателя производилась при каждой замене локализатора, а первая дефектация производилась после 5000 ± 100 подрывов при плановой замене локализатора.

При первой дефектации (после 5000 подрывов) производилась проверка электрических характеристик нагревателя, при которой замеряется активное сопротивление жилы

$R_{\text{жилы}}$ между концами кабеля и сопротивление изоляции $R_{\text{изол}}$ между жилой и нержавеющей оболочкой кабеля.

Нагреватель считается исправным если:
 $R_{\text{жилы}} = 0,09 - 0,15$ Ом при температуре 20°C ;
 $R_{\text{изол}} =$ не менее $0,5$ МОм ($U_{\text{контр}} = 500$ В) при температуре 20°C .

Согласно результатам периодической дефектации нагревателя после достижения каждого 5000 подрывов и начального этапа эксплуатации КУ ресурс нагревателей составил 16608 подрыва, что соответствует конструктивным особенностям нагревателя как источника электромагнитной энергии и условий эксплуатации.

Результаты ряда проведённых исследований по установлению прочностных характеристик материала (стали 15 XМ) локализатора показали:

1. Прочностные характеристики материала локализатора, оцененные по пределу текучести и пределу прочности при растяжении, после 10000 подрывов изменились не существенно.

2. Пластичность материала локализатора, оцененная по относительному удлинению при

растяжении, после 100000 подрывов изменилась не существенно.

3. Надёжность материала локализатора и его способность сопротивляться хрупкому разрушению, оцененные по ударной вязкости после 10000 подрывов, изменились не существенно.

4. Исследования микроструктуры материала локализатора показали, что изменений структуры стали 15ХМ после 10000 подрывов практически не наблюдается.

Материал локализатора (сталь 15ХМ) сохранил ресурс работоспособности после 10000, что позволяет сделать вывод о возможности увеличения ресурса локализатора до 10000 подрывов.

Результаты проведенных исследований по изучению прочностных характеристик локализатора позволили существенным образом повысить производительность ТЛ РУ и тем самым сократить сроки уничтожения БСК.

Литература

1. Капашин В.П., Кармишин А.Ю., Коваленко И.В. Создание технологии уничтожения БСК // Труды седьмой всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». Ч. II. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.

2. Капашин В.П., Холстов В.И., Мандыч В.Г., Кармишин А.Ю., Коваленко И.В., Краснянский А.И. Безопасный процесс уничтожения боеприпасов сложной конструкции – от концепции до технологии // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 3. С. 29–34.

3. Кармишин А.Ю., Воронин В.А., Клустер А.Е., Коваленко И.В. Отчёт о НИР «Этапы создания и развития технологии уничтожения БСК», М.: НИЦ ФУ по БХУХО, 2015.

4. Юсупов В.С., Чопоров В.Ф., Севостьянов М.А., Арсенкин А.М. Отчёт по НИР «Техническое обследование и анализы по определению влияния взрывной нагрузки на прочностные характеристики локализатора». М.: ИМЕТ РАН, 2013.

5. Юсупов В.С., Чопоров В.Ф., Севостьянов М.А., Арсенкин А.М. Отчёт о НИР «Техническое обследование и анализы по определению влияния взрывной нагрузки на прочностные характеристики локализатора». М.: ИМЕТ РАН, 2014.

References

1. Kapashin V.P., Karmishin A.Yu., Kovalenko I.V. the technology of CDM destruction // Trudy sedmoy vsrossiyskoy konferentsii «Neobratimyye protsessy v prirode i tekhnike». Ch. II. M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2013 (in Russian).

2. Kapashin V.P., Kholstov V.I., Mandych V.G., Karmishin A.Yu., Kovalenko I.V., Krasnyanskiy A.I. Secure decommission of complex design ammunition – from concept to technology // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2015. № 3. P. 29–34 (in Russian).

3. Karmishin A.Yu., Voronin V.A., Klyuster A.E., Kovalenko I.V. Report on the research project «The stages of creation and development of the technology of CDM destruction». M.: NITs FU po BKhUKhO, 2015 (in Russian).

4. Yusupov V.S., Choporov V.F., Sevostyanov M.A., Arsenkin A.M. Report on the research project «Technical inspection and testing for determining the impact of the blast load on the strength characteristics of the localizer». M.: IMET RAN, 2013 (in Russian).

5. Yusupov V.S., Choporov V.F., Sevostyanov M.A., Arsenkin A.M. Report on the research project «Technical inspection and testing to determine the impact of the blast load on the strength characteristics of the localizer». M.: IMET RAN, 2014 (in Russian).