

**Гусаров А.М., д-р техн. наук Кузнецов А.А.,  
канд. техн. наук Дмитракович Н.М.\***

**Использование метода динамического индентирования  
для комплексной оценки материала верха боевой одежды  
пожарных при многоцикловом тепловом воздействии**

*УО «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск  
\* Учреждение «Научно-исследовательский центр  
Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь», г. Витебск*

Предложен новый методологический подход с разработкой соответствующих математических моделей для оценки показателей вязкоупругих свойств материала верха боевой одежды пожарных при многоцикловом тепловом воздействии. Практическое использование разработанных моделей позволяет осуществить прогноз значений статического и динамического модуля упругости, максимального внедрение индентора, а также произвести оценку процесса изменения теплофизических свойств материала верха боевой одежды пожарных при многоцикловом воздействии теплового потока плотностью от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>.

*Ключевые слова:* боевая одежда пожарных, материал верха боевой одежды пожарных, многоцикловое тепловое воздействие, метод динамического индентирования, статический и динамический модуль упругости, максимальное внедрение индентора, математическая модель

### **Введение**

Боевая одежда пожарных (далее – БОП) предназначена для обеспечения безопасных условий работы пожарных. Она является непосредственным препятствием между человеком и опасными факторами пожара. К ней предъявляются высокие требования по показателям защиты, эргономики, гигиены, уровню адаптации и т. д. Это касается как конструктивного исполнения, так и используемых для ее изготовления материалов.

Пакет материалов и тканей, используемых для изготовления БОП, состоит из материала верха, водонепроницаемого слоя, съемной

теплоизоляционной подкладки и подкладочной ткани.

Материал верха БОП – наружный слой пакета материалов, используемый для изготовления БОП, обеспечивающий защиту тела человека от воздействия высоких температур окружающей среды, тепловых потоков, открытого пламени, контакта с нагретыми поверхностями, механических воздействий, воды и агрессивных сред, а также от неблагоприятных климатических воздействий [1].

Производители современной БОП, стоящей на вооружении подразделений МЧС Республики Беларусь, гарантируют ее соответствие требованиям действующего стандар-

та СТБ 1971-2009 «Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарная боевая. Общие технические условия» [1] (например, РПУП «Униформ», г. Микашевичи, Декларация о соответствии № ВУ / 112 10.1 2Д 033 00034).

Требованиями [1] допускается снижение физико-механических показателей материала верха БОП (разрывной нагрузки, сопротивления раздиранью) при однократном тепловом воздействии: при воздействии теплового потока плотностью 5,0 и 40,0 кВт/м<sup>2</sup> в течение соответственно 240 и 5 с – не более чем на 20 %, и при воздействии температуры 300°С в течение 300 с – не более чем на 30 % от значений, указанных в стандарте.

Однако в процессе эксплуатации БОП фактически сталкивается с нагрузкой (тепловой, механической и т.д.), носящей многоцикловой характер. Оценка и контроль защитных свойств БОП в процессе эксплуатации производится путем внешнего осмотра [1], а использование только визуального контроля неизбежно влечет за собой субъективность оценки показателей, определяющих качество материалов, и, как следствие, невозможность достоверно и объективно оценить эффективный срок их эксплуатации [2].

Проведение масштабных и систематических эксплуатационных испытаний по определению соответствия БОП нормативным требованиям к физико-механическим показателям материала верха БОП не проводятся, так как определение боль-

шинства физико-механических показателей материала верха БОП связано с повреждением или разрушением образца, а используемые при изготовлении БОП материалы имеют высокую стоимость.

Комплексная оценка показателей физико-механических свойств материалов БОП при воздействии различных эксплуатационных факторов (многократные тепловые, механические воздействия и др.) и контроль свойств не просто материалов или образцов-свидетелей, а непосредственно изделий без их повреждения или разрушения позволит выявить резервы эксплуатационной надежности и прогнозировать эффективный срок службы БОП.

В связи с этим определенным интересом представляют метод динамического индентирования, неразрушающий метод оценки физико-механических свойств и структуры материалов. Этот метод заключается в нанесении индентором испытательного удара и непрерывной регистрации процесса контактного взаимодействия индентора с материалом. Получаемая экспериментальная зависимость «контактное усилие – глубина внедрения индентора»  $P(\alpha)$  является основным источником информации о материале и наиболее полно отражает его свойства, являясь функцией и упругих, и вязких характеристик материала. Методика определения вязкоупругих характеристик методом индентирования подробно описаны в [2]. Этот метод отличается высоким уровнем информативности, полная автоматизация

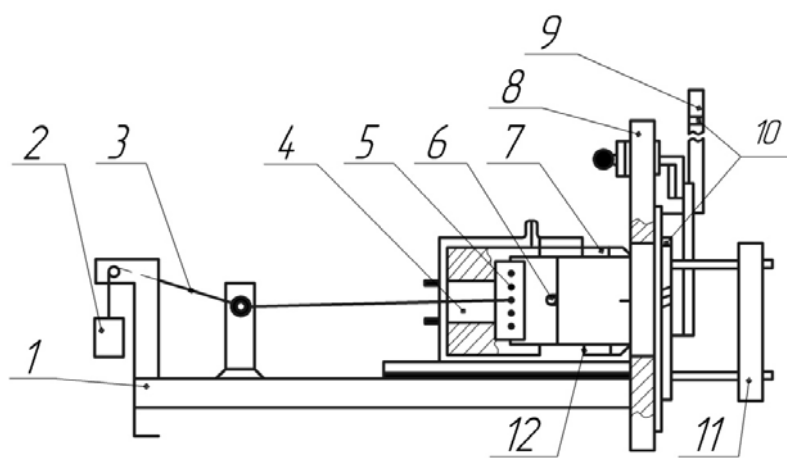
Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций процессов испытания и обработки результатов.

Данная работа посвящена исследованию методом динамического индентирования влияния многоциклового теплового воздействия на физико-механические свойства БОП при сжатии.

### Основная часть

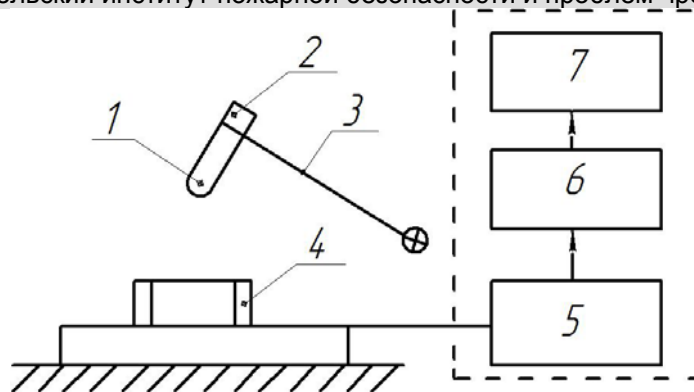
Для исследования влияния многоциклового теплового воздействия на физико-механические свойства БОП при сжатии на базе научно-исследовательского центра Витебского областного управления МЧС проведен ряд экспериментальных исследований.

Объектом исследования являлась ткань из термостойкого синтетического волокна «Арселон-С» (артикул 09с-368/1 саржевого переплетения, поверхностная плотность  $(260 \pm 14) \text{ г/м}^2$ ), которая используется в качестве материала верха боевой одежды пожарных в подразделениях МЧС Беларуси. При проведении исследований использовались: установка для определения устойчивости к воздействию теплового потока (рис. 1), приемник теплового потока ПТПО №192, измеритель-регулятор «Сосна-002», термоэлектрический преобразователь ТХА-1199/53, секундомер «Интеграл С-01», установка для определения вязкоупругих характеристик материалов «ИМПУЛЬС-1Р» (рис. 2).



- 1 – платформа; 2 – груз; 3 – нити; 4 – датчик измерения плотности теплового потока; 5 – зажим; 6 – термопара; 7 – держатель пробы; 8 – экран; 9 – защитная заслонка; 10 – система охлаждения; 11 – радиационная панель; 12 – проба

Рис. 1 Установка для определения устойчивости к воздействию теплового потока



- 1 – индентор; 2 – магнит; 3 – поворотный рычаг; 4 – индукционный датчик;  
 5 – предварительный усилитель; 6 – аналого-цифровой усилитель;  
 7 – персональный компьютер

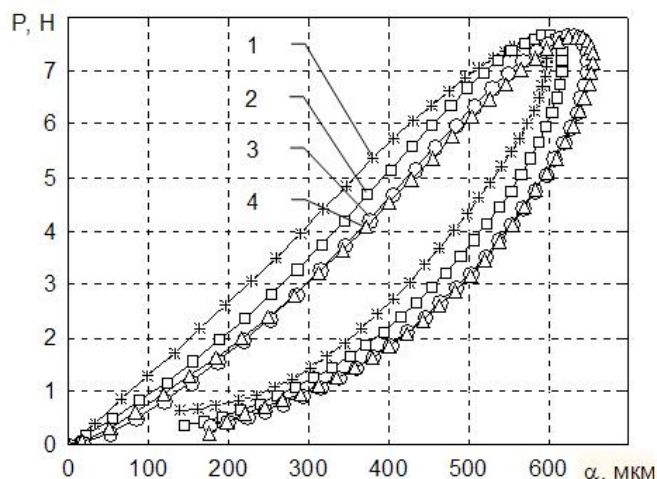
Рис. 2 Установка «ИМПУЛЬС-1Р»

Образец материала размером 210×70 мм подвергался воздействию теплового потока плотностью в диапазоне от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>, действие которого гарантированно не приводит к возникновению видимых признаков деструкции наружной и внутренней поверхности материала верха: оплавления, обугливания, прогара. Продолжительность теплового воздействия составляло 240 с. Охлаждение образца продолжалось до достижения начальной температуры на внутренней поверхности образца ( $T_0 = 26\text{ }^\circ\text{C}$ ).

После завершения этапа охлаждения образец подвергался повторному тепловому воздействию установленного теплового потока. В процессе исследования регистрировались значения температуры на внутренней поверхности пакета материалов. Для измерения температуры на внутренней поверхности пакета материалов использовался термоэлектрический преобразователь типа

ХК (хромель-копель), прикрепленный по центру образца. Для измерения значений плотности теплового потока использовался датчик типа Гордона с диапазоном измерения от 1 до 50 кВт/м<sup>2</sup> и погрешностью измерений не более 8 %, данные которого выводились на вторичный прибор с классом точности не менее 0,15. После этапа многоциклового теплового нагружения производилась регистрация значений показателей вязкоупругих свойств образцов материалов с помощью установки ИМПУЛЬС-1Р.

В результате экспериментальных исследований получены зависимости «контактное усилие – глубина внедрения индентора»  $P(\alpha)$  для материала верха после многоциклового (нагрев–охлаждение) нагружения для различной плотности падающего теплового потока. Некоторые результаты исследований представлены на рис. 3.



1 – до теплового воздействия; 2 – после 1-го цикла нагрузки;  
3 – после 5-го цикла нагрузки; 4 – после 10-го цикла нагрузки

Рис. 3 Зависимость «контактное усилие – глубина внедрения»  $P(\alpha)$  для материала верха БОП при многоцикловой тепловой нагрузке плотностью  $q_{п} = 5 \text{ кВт/м}^2$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что наиболее заметное влияние многоцикловая тепловая нагрузка оказывает на следующие показатели вязкоупругих свойств: максимальное внедрение индентора, статический и динамический модуль упругости. Статический или равновесный модуль упругости – модуль упругости, рассчитанный при длительном дей-

ствии нагрузки. Динамический модуль упругости – модуль упругости, определенный отношением напряжения к деформации растяжения (сжатия) при динамическом режиме работы материала.

Некоторые численные значения указанных выше показателей вязкоупругих свойств материала верха сведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Показатели вязкоупругих свойств материала верха в зависимости от количества циклов воздействия теплового потока плотностью  $3 \text{ кВт/м}^2$

Показатель	Ед. изм.	До теплового воздействия	Количество циклов теплового воздействия				
			1	3	5	8	10
Статический модуль упругости	МПа	3,17	3,09	2,97	2,93	2,92	2,93
Динамический модуль упругости	МПа	25,04	23,98	23,26	22,47	22,39	22,52
Максимальное внедрение	мкм	597,61	614,45	624,39	638,22	639,88	640,28

Таблица 2

Показатели вязкоупругих свойств материала верха в зависимости от количества циклов воздействия теплового потока плотностью 5 кВт/м<sup>2</sup>

Показатель	Ед. изм.	До теплового воздействия	Количество циклов теплового воздействия				
			1	3	5	8	10
Статический модуль упругости	МПа	3,17	3,06	2,91	2,87	2,85	2,86
Динамический модуль упругости	МПа	25,04	23,68	22,14	21,68	21,72	21,62
Максимальное внедрение	мкм	597,61	617,32	637,39	647,32	651,12	654,61

Относительные изменения показателей вязкоупругих свойств материалов верха по сравнению с показателями материала, не подвергавшегося тепловому воздействию, представлены на рис. 4, 5.

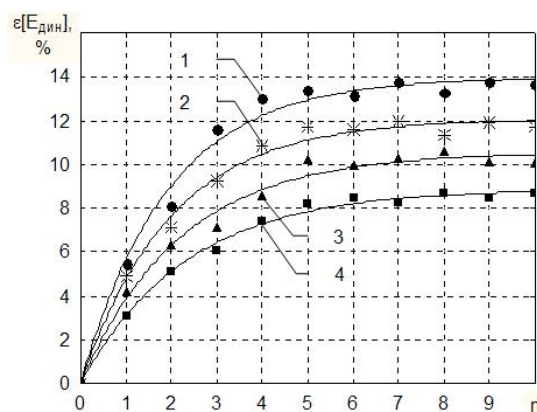


Рис. 4 Зависимость относительного изменения динамического модуля упругости материала верха  $\epsilon[E_{дин.}]$  от количества циклов теплового нагружения  $n$  при различных значениях уровня теплового воздействия  $q_p$ : 1 – 5 кВт/м<sup>2</sup>; 2 – 4 кВт/м<sup>2</sup>; 3 – 3 кВт/м<sup>2</sup>; 4 – 2 кВт/м<sup>2</sup>

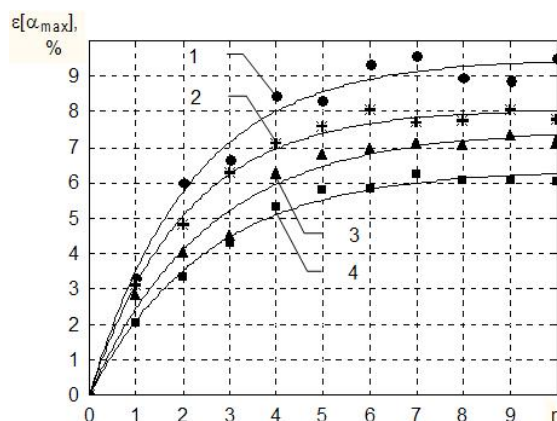


Рис. 5 Зависимость относительного изменения максимального внедрения индентора для материала верха  $\epsilon[\alpha_{max.}]$  от количества циклов теплового нагружения  $n$  при различных значениях уровня теплового воздействия  $q_p$ : 1 – 5 кВт/м<sup>2</sup>; 2 – 4 кВт/м<sup>2</sup>; 3 – 3 кВт/м<sup>2</sup>; 4 – 2 кВт/м<sup>2</sup>

Комплексный анализ результатов экспериментальных исследований позволяет отметить следующее:

– с увеличением количества циклов нагружения тепловым потоком в исследованном диапазоне значения динамического и статического модуля упругости уменьшаются, а максимальное внедрение – увеличивается, что вполне закономерно и связано с происходящими структурными изменениями материалов;

– степень изменения указанных выше показателей вязкоупругих свойств зависит от уровня плотности теплового потока;

– после некоторого количества циклов теплового воздействия в материале верха наступает состояние, близкое к устойчивому (стационарному), при котором показатели вязкоупругих свойств материала верха БОП остаются постоянными и практически не зависят от количества циклов теплового воздействия (рис. 4, 5).

Для повышения информативности результатов экспериментальных исследований возникает необходимость в установлении закономерности относительного изменения максимального внедрения индентора, статического и динамического модуля упругости материала верха БОП от количества циклов теплового нагружения для исследованного диапазона теплового воздействия.

Для количественного описания зависимости относительного изменения максимального внедрения ин-

дентора, статического и динамического модуля упругости материала верха боевой одежды пожарного от количества циклов теплового воздействия можно рекомендовать математическую модель следующего вида [4]:

$$\varepsilon(n) = \varepsilon_c - \varepsilon_c \exp[-Mn], \quad (1)$$

где  $\varepsilon_c$  – относительное изменение показателя вязкоупругих свойств (максимальное внедрение индентора, статический и динамический модуль упругости) в устойчивом состоянии материала верха, при котором значение данного показателя вязкоупругих свойств материала верха остается постоянным и больше не зависит от количества циклов теплового воздействия, %;

$n$  – количество циклов теплового воздействия, цикл.

Для определения физического смысла параметра  $M$  модели (1) произведем преобразования

$$\frac{\varepsilon_c - \varepsilon(n)}{\varepsilon_c} = \exp[-Mn].$$

Если  $M = 1/n$ , то

$$\frac{\varepsilon_c - \varepsilon(n)}{\varepsilon_c} = \frac{1}{e}.$$

Следовательно, параметр  $M$  имеет размерность [цикл<sup>-1</sup>] и является величиной, обратной количеству циклов теплового нагружения  $n$ , по истечении которых текущее изменение показателя вязкоупругих свойств  $\varepsilon(n)$  по отношению к изменению показателя вязкоупругих

Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций свойств при устойчивом состоянии материала  $\varepsilon_c$  меньше в  $e$  раз.

Оценка параметров, предложенных в математической модели (1), производилась с использованием программного пакета статистиче-

ской обработки данных «Statistica for Windows». Численные значения параметров модели (1) в зависимости от плотности падающего теплового потока сведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры модели (1) для расчета относительного изменения статического и динамического модуля упругости, максимального внедрения индентора для материала верха боевой одежды пожарного при многоцикловом тепловом воздействии

Параметры модели	Плотность падающего теплового потока, кВт/м <sup>2</sup>			
	2	3	4	5
Статический модуль упругости				
$\varepsilon_c, \%$	6,62	7,92	8,74	10,18
$M, \text{цикл}^{-1}$	0,43	0,48	0,51	0,50
Коэффициент детерминации, $R^2$	0,995	0,989	0,996	0,992
Динамический модуль упругости				
$\varepsilon_c, \%$	8,89	10,56	12,09	13,97
$M, \text{цикл}^{-1}$	0,43	0,46	0,50	0,52
Коэффициент детерминации, $R^2$	0,994	0,984	0,992	0,988
Максимальное внедрение				
$\varepsilon_c, \%$	6,38	7,51	8,10	9,52
$M, \text{цикл}^{-1}$	0,40	0,40	0,49	0,46
Коэффициент детерминации, $R^2$	0,992	0,983	0,993	0,986

По результатам математического моделирования установлено:

– увеличение плотности падающего теплового потока приводит к увеличению относительного изменения показателей вязкоупругих свойств материала верха при его стабилизации  $\varepsilon_c$  в исследованном диапазоне теплового воздействия;

– численные значения параметра  $M$  модели (1) практически не зависят от плотности тепловой нагрузки  $q_{\text{п}}$  в исследованном диапазоне ее

значений, а определяются структурными характеристиками исследуемого материала.

Для определения количества циклов теплового воздействия, после которых наступает стабилизация показателей вязкоупругих свойств материала верха БОП, введем понятие интенсивности процесса изменения показателей вязкоупругих свойств материала верха БОП:

$$I_{\varepsilon}(n) = \frac{d\varepsilon}{dn} = M\varepsilon_c \exp[-Mn]. \quad (2)$$



Численные значения интенсивности процесса относительного изменения статического и динамического модуля упругости, максимального внедрения индентора для материала верха БОП при многоцикловом тепловом воздействии, определенные на основании формулы (2), позволяют отметить, что:

– плотность падающего теплового потока  $q_n$  влияет на начальное значение интенсивности процесса изменения показателей вязкоупругих свойств  $I_\varepsilon$  материала верха БОП, однако начиная с восьмого цикла теплового воздействия значение интенсивности  $I_\varepsilon$  незначительно зависит от уровня падающего теплового потока ( $I_\varepsilon(n=8) = (0,1-0,15) \%$ /цикл) для относительного изменения статического и динамического модуля упругости, максимального внедрения индентора при  $1 \leq q_n \leq 5$  кВт/м<sup>2</sup>). Следовательно, изменение вязкоупругих свойств материала верха БОП происходит в течение первых восьми циклов теплового воздействия, а в дальнейшем наступает состояние стабилизации материала и, соответственно, устойчивость его вязкоупругих свойств к многоцикловому воздействию теплового потока плотностью от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>;

– на основании результатов проведенных исследований по устойчивости пакета материалов БОП к многоцикловому тепловому воздействию [5] установлено, что изменение теплофизических свойств пакета материалов происходит в течение первых восьми циклов теплового воздействия, а в дальнейшем

наступает состояние тепловой стабилизации пакета материалов и, соответственно, устойчивость его теплофизических свойств к многоцикловому воздействию теплового потока в диапазоне от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>. То есть стабилизация теплофизических и вязкоупругих свойств материала верха БОП происходит в течение первых восьми циклов теплового воздействия. Коэффициенты корреляции Пирсона между значениями основного показателя теплофизических свойств – максимальной температурой на внутренней поверхности пакета материалов БОП и значениями показателей вязкоупругих свойств материала верха БОП находятся в диапазоне от 0,94–0,99 (уровень значимости  $p < 0,05$ ) в зависимости от плотности падающего теплового потока и показателя вязкоупругих свойств.

Таким образом, с помощью метода динамического индентирования можно не только определить показатели вязкоупругих свойств, но и осуществить прогноз процесса стабилизации теплофизических свойств материала верха БОП.

### Заключение

В результате проведенного комплекса исследований установлено, что увеличение количества циклов теплового нагружения приводит к закономерному изменению показателей вязкоупругих свойств материала верха БОП. Показано, что после некоторого количества циклов теплового воздействия в материале верха наступает состояние стабилиза-

ции и, соответственно, устойчивость его вязкоупругих свойств к многоцикловому тепловому воздействию в диапазоне от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>. Разработаны математические модели, которые позволяют осуществить прогноз относительного изменения значений максимального внедрения индентора, статического и динамического модуля упругости для материала верха БОП от количества циклов теплового воздействия при многоцикловом воздействии теплового потока в диапазоне от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>, а также определить эффективное количество циклов теплового воздействия, после которых наступает процесс стабилизации вязкоупругих свойств материала. Показано, что использование метода динамического индентирования позволяет не только определить показатели вязкоупругих свойств, но и дать оценку процесса изменения теплофизических свойств материала верха БОП при многоцикловом воздействии теплового потока плотностью от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *СТБ 1971-2009.* Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Госстандарт – НИЦ ВОУ МЧС г. Витебск, 2010. – 36 с.

2. *Slater, K.* The progressive deterioration of textile materials, I: Characteristics of degradation / K. Slater // *Journal of the Textile Institute.* – 1986. – Vol. 77, No. 2. – p. 76-87.

3. *Рудницкий, В.А.* Испытание эластомерных материалов методами индентирования / В.А. Рудницкий, А.П. Крень; под ред. П.П. Прохоренко. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 227 с.

4. *Богдановф, Дж.* Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богдановф, Ф. Козин. – М.: Мир, 1989. – 245 с.

5. *Гусаров, А.М.* Исследования устойчивости пакета материалов боевой одежды пожарного к многоцикловому тепловому воздействию / А.М. Гусаров, А.А. Кузнецов, Н.М. Дмитракович // *Вестник Витеб. госуд. технол. ун-та.* – 2011. – № 22. – С. 46–52.

