

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

**16+
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 4

**Тула
Издательство ТулГУ
2024**

Стариков Николай Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, starikov_taii@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DEPENDENCE OF THE WEAR INTENSITY ON THE MICROHARDNESS OF TUNGSTEN CARBIDE COATINGS FOR ALUMINUM DRILL PIPES

V.A. Yakhimovich, A.D. Breki, N.E. Starikov

The article implements the development and experimental verification of a mathematical model describing the dependence of the wear intensity on the hardness of coatings of various compositions applied by high-speed flame spraying on drill pipes made of aluminum alloy grade D16. The verification is implemented through a regression analysis of the experimental data obtained, as a result of which the validity of the refined mathematical model of wear, built using the fatigue theory of wear, is established.

Key words: mathematical model of wear, drill pipe, microhardness, tungsten carbide, wear-resistant coating.

Yakhimovich Valery Aleksandrovich, leading engineer of the research and educational center "Weatherford-Polytechnic", yakh@spbstu.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Breki Alexander Dzhalyulevich, doctor of technical sciences, professor of the BaltTribo-Polytechnic Research Center, leading researcher at the Friction and Wear Laboratory, albreki@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Problems of Machine Science of the Russian Academy of Sciences,

Starikov Nikolay Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, starikov_taii@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 623.4

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-487-488

АНАЛИЗ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПУЛИ НА СЛОИСТЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ

А.А. Громов, М.С. Воротилин, А.Н. Павлюченко, Ю.В. Чебурков, А.С. Ишков

Анализ удара объекта об испытываемый образец является важным аспектом проектирования, связанным с ударной вязкостью материала. На основе обзора были проанализированы различные параметры, влияющие на баллистическое воздействие. Было обнаружено, что параметрами, оказывающими основное влияние на удар, являются угол, толщина и параметры композитного материала. Удар пули о слоистый испытываемый образец был проведен экспериментально и смоделирован с использованием подхода метода конечных элементов.

Ключевые слова: динамический анализ, скорость, пуля, испытательный образец, напряжение.

Воздействие пули на образец может быть проанализировано экспериментальными, имитационными и численными методами. Подход с явной динамикой попадания пули в цель может быть средством моделирования и анализа влияния различных параметров, таких как угол наклона, толщина пластины, расстояние между пластинами и т.д. И может помочь в эффективном проектировании компонентов, таких как бронежилеты, пуленепробиваемые щиты и т.д.

Влияние угла наклона пластины на баллистическую стойкость и поражаемость поражаемых целей пулями с деформацией наконечника обсуждалось было замечено, что при изменении угла режимы локального разрушения мишени также демонстрируют переходный период. Было показано, что явное численное моделирование на основе Ansys позволяет эффективно предсказывать поведение цели при связанной с ней деформации пули. Горячекатаные листы конструкционной стали были исследованы на предмет их баллистической стойкости при ударе. Монолитные и многослойные пластины в закаленном состоянии и в исходном состоянии подвергались ударам бронебойных пуль калибра 7,62 мм. Баллистические испытания показали, что монолитные пластины, закаленные в корпусе, обладают превосходной прочностью, в то время как сопротивление перфорации пластин увеличилось на 20% за счет упрочнения корпуса [1].

Монолитные и многослойные пластины из мягкой стали, которые находились в контакте и на расстоянии друг от друга, были проанализированы на влияние угла наклона на их баллистические характеристики, основанные на косом и нормальном ударе. Численное моделирование, основанное на использовании метода конечных элементов, было подтверждено экспериментальными результатами. Было использовано численное моделирование, основанное на модели материала для упруго-вязко пластичных материалов Джонсона Кука, откалиброванной для мягкой стали. С увеличением угла наклона в изученных конфигурациях наблюдались отличные баллистические характеристики. Изменение расстояния сокращает длину пули и, как видно, оказывает большое влияние при нормальных условиях поражения. Баллистические характеристики пластин каждой конфигурации были количественно определены с точки зрения процесса проникновения, предельной баллистической скорости и остаточной деформации. Среди всех панелей монолитные панели из высокопрочной стали показали наилучшие баллистические характеристики [2].

Численно и экспериментально исследовано нормальное воздействие конических вольфрамовых пуль на целевые плоские пластины из карбида кремния при углах половины вершины 5-15° и 5° с последующим сравнением с цилиндрическими пулями. Разрушение при испытании на удар происходит при скорости перехода, значительно меньшей для конических пуль по сравнению с цилиндрическими. Видно, что начальное проникновение конических пуль заметно отличается от того, которое наблюдается для цилиндрических пуль со скоростью выше переходной. Проанализированы удары пуль под разными углами падения при различной толщине пластин мишени.

Обнаружено, что сопротивление мишени увеличивается с наклоном удара. Также видно, что критический угол рикошета пули уменьшается с увеличением толщины мишени. Обнаружено, что при обычном попадании изменение расстояния влияет на баллистическую стойкость до тех пор, пока расстояние не станет меньше длины пули. В для обеспечения аналогичного сопротивления перфорации при уменьшенном весе с точки зрения механизма рассеивания энергии. При использовании лицевого слоя из высокопрочной стали наблюдается увеличение удельной баллистической энергии на 54%, в то время как при использовании слоя из алюминиевого минимума наблюдается его снижение по сравнению с монолитной пластиной из высокопрочной стали.

Метод конечных элементов используется для критической оценки эффективности защиты для двухслойных экранов, подверженных воздействию пуль со скоростью, меньшей, чем у боеприпаса. Баллистические характеристики двухслойных конструкций улучшаются на 8-25% при плоской конфигурации носовой части по сравнению с монолитной, тогда как поведение пули при конической конфигурации носовой части почти аналогично поведению монолитной плиты [3].

Экспериментальный метод, необходимый для проведения полной настройки (Рис. 1) для проведения теста, например, такого, как подготовка установки для испытания на попадание пули, требуется оборудование: баллистический ствол, пуля, видеокамера с высоким разрешением пикселей, броня, в которой должно проводиться тестирование.



Рис. 1. Экспериментальная установка

Различными подходами (Рис. 2), используемыми для анализа воздействия пули, были метод моделирования, численный метод и экспериментальный метод. Некоторые исследователи использовали один или несколько методов, чтобы мы могли сравнить каждое значение, и значения должны быть близки друг к другу [4]. Различными материалами, протестированными для анализа воздействия, были пластины NVE 36 размером 300x300 мм, толщиной 12 мм, 6 мм и 4 мм, монолитные (1x12) или слоистые (6x2 мм и 4x3 мм), также некоторые пластины аналогичной толщины были закалены в корпусе (CH). Для проведения эксперимента была создана полная настройка, пули с углом наклона 22,5°, 34° и 45° приводил к сплющиванию наконечника, выбрасывал пробку, а также вызывал кручение мишени наряду с радиальным растрескиванием, а пуля с углом при вершине 66,5 и 90 градусов имел закругленные наконечника. Моделирование как цели, так и пули были выполнено в виде трехмерных деформируемых тел.



Рис. 2. Подход для моделирования

Влияние угла при вершине видно как в экспериментальном, так и в моделируемом методе. Экспериментальный метод (Рис. 3) был применен для пули с различным углом прицеливания. Плиты были использованы для теста, имеющего размер 300x300 мм, толщина 12 мм, 6 мм, 4 мм в блоки (1x12) или многослойные (6x2 мм и 4x3мм), также некоторые плиты аналогичной толщины корпуса были закаленные. Также проводились испытания материала с использованием теста на квазистатическое одноосное растяжение и теста на твердость по Виккерсу как для закаленного корпуса, так и для полученных пластин. Расстояние между мишенью и дульным срезом составляло 1 м, при жестком заднем креплении, высокоскоростная камера (phantom v1610) использовалась для записи, а также для оптического измерения поражающей и остаточной скорости. Скорость удара для полученных пластин (AR) варьировалась от 450 до 950 м/с, а для пластин CH – от 680 до 950 м/с. Всего было проведено 57 испытаний на удар.

Результаты экспериментальных испытаний (Рис. 4) показали, что уменьшение длины пули экспоненциально зависит от угла прицеливания, а также было замечено, что испытываемое сопротивление пули больше при большей площади поверхности конической части, контактирующей с мишенью. С помощью моделирования было обнаружено, что причиной сплющивания наконечника является внезапное уменьшение скорости, а затем увеличение ускорения. Причины образования трещин и уменьшения длины пули устранены из моделирования. Экспериментальные результаты отличаются примерно на 20% от результатов моделирования.

Кроме того, предельная баллистическая скорость для пластин СН увеличивается на 20% больше, чем для пластин AR, независимо от наслоения. Для лучшего понимания, численное моделирование-исследование проводилось с использованием модифицированной модели материала Джонсона-Кука наряду с калибровкой материала. Численное моделирование дало приблизительный результат в 11% для AR-пластин, а для СН-пластин он составил 3%.

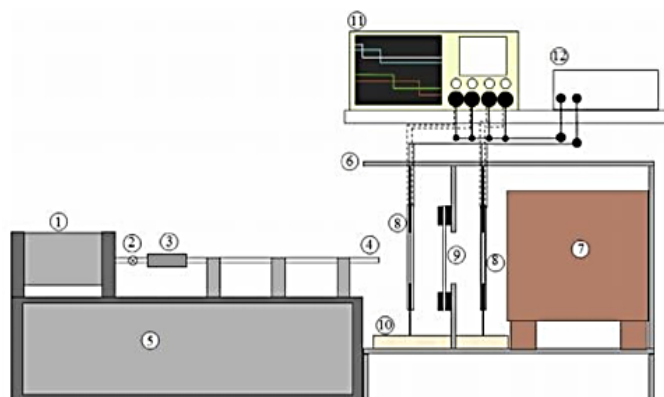


Рис. 3. Изображение экспериментальной установки: 1 – воздушный цилиндр, 2 – шаровой кран, 3 – отверстие для зарядки пули, 4 – ствол, 5 – станина, 6 – рама, 7 – воздух для извлечения пули, 8 – набор фольги для изменения скорости, 9 – мишень, 10 – улучшенная амортизация, 11 – осциллограф, 12 – схема питания

Также изучалось воздействие многослойных и разнесенных мягких мишеней. Был проведен анализ баллистического предела различной толщины для пуль с диаметром пули 7,62 мм при косом и нормальном ударе. Конструкция пули с сердечником, предполагающая наличие полосы свинцового колпачка и оболочки, выполнена вместе с размерами мишеневых пластин 200x200 мм. Сделано предположение о деформируемом материале как для пули, так и для пластины-мишени. Нормальная скорость полета, принятая для численных и экспериментальных результатов для испытательного образца толщиной 4,7, 6, 10, 12 и 16 мм, составляла 820 м/с.

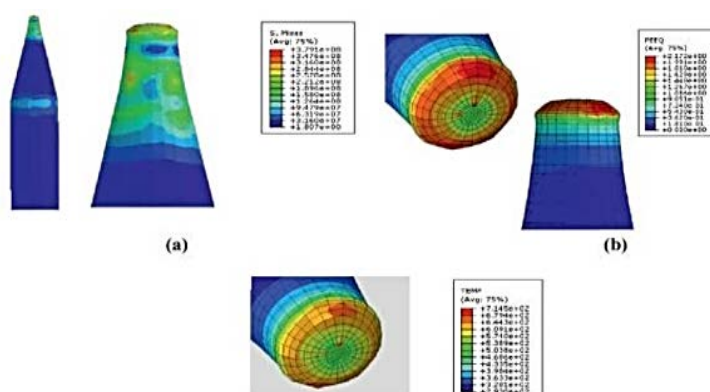


Рис. 4. График контура (а) напряжения по Мизесу (б) эквивалентной пластической деформации (в) распределения температуры уплотненного наконечника

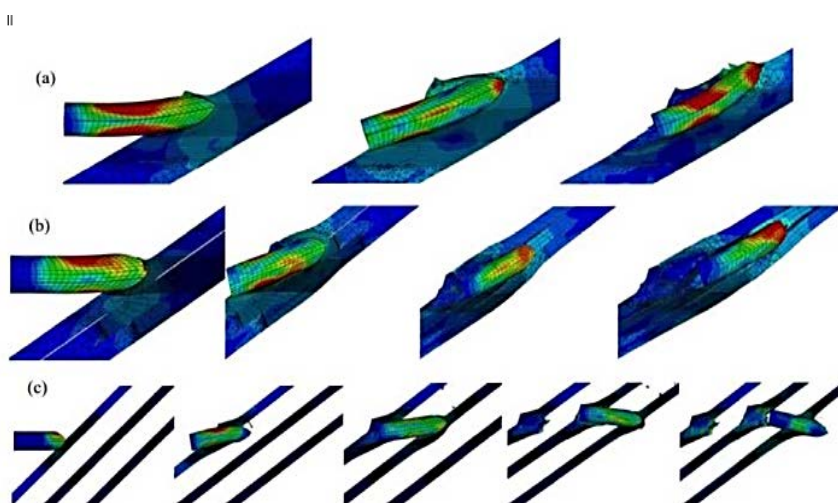


Рис. 5. Деформация (а) монолитной пластины, (б) конфигурация слоистой контактной пластины (с) конфигурация с разнесением

Логично, что сопротивление цели увеличивается с увеличением толщины. Остаточные скорости сравнивались для каждой толщины с помощью эксперимента, численного расчета и модели. Обнаружено максимальное различие в 6% между экспериментом и моделью. Были представлены результаты баллистики различной толщины, соответствующие различным углам т.е. 0, 30 и 45°. Обнаружено, что с увеличением угла минимальная скорость падения увеличивается. Для численного метода при необходимости была подготовлена расширенная мелкая сетка.

Устойчивость к баллистическому удару изучалась при различных углах 0, 30, 45 и 60° для монолитных материалов толщиной 10 мм, слоистого материала, контактирующего с трехслойным материалом толщиной 3,3 мм, и разнесенной конфигурации материала, включающей трехслойный материал толщиной 3,33 мм с шагом 10 мм (рис. 5).

Рассмотрено влияние расстояния между пластинами, и было обнаружено, что как наклон, так и расстояние оказывают одинаковое влияние на баллистическую стойкость. Не было замечено никакой разницы ни в малой распространенности слоистых или монолитных конфигураций, ни в разнесенных пластинах, но при наклоне разница начала проявляться значительно, и основной причиной этого было изменение направления полета пули во время перфорации.

Аналогичным образом можно изучать различные отклонения и влияние факторов. Анализируя различные результаты для угла при вершине, было обнаружено, что 45-градусные углы при вершине являются лучшими проникающими элементами; среди них была выбрана наилучшая конфигурация.

Различные параметры, такие как угол, расстояние между пластинами, наклон и т.д. были проанализированы на предмет воздействия пули, что имеет практическое значение для улучшения конструкции щитов для мишеней, бронежилетов, бронежилетов и аналогичного оборудования безопасности. Сосредоточенность на оптимизации этих параметров приведет к эффективному использованию оборудования с максимальной эффективностью и экономией. Для заданных целевых характеристик необходимо изучить альтернативные механизмы с выбором наиболее подходящего из них.

Список литературы

1. Виджаян В., Хегде С., Гупта Н.К. Деформационные и баллистические характеристики конические алюминиевые элементы, поражающие тонкие алюминиевые мишени: влияние угол при вершине Int, J. Impact Eng., 2017. 110. С. 39-46.
2. Холмен Дж.К., Сольберг Дж.К., Хопперстад О.С., Борвик Т. Баллистическое воздействие многоуровневой и пластины из закаленной стали Int, J. Impact Eng., 2017. 110. С. 4-14.
3. Икбал М.А., Сентхил К., Мадху В., Гупта Н.К. Косое воздействие на однослойную и разнесенные цели из мягкой стали с помощью пуль 7,62 AP Int, J. Impact Eng., 2017. 110. С. 26-38.
4. Рахман Н.А., Абдулла С., Замри В.Ф.Х., Абдулла М.Ф., Омар М.З., Саджури З. Баллистический предел высокопрочной стали и многослойных пластин Al7075-T6 по, 2016. С. 165-176.

Громов Алексей Александрович, курсовой офицер – преподаватель (соискатель), darkzgrom@gmail.com, Россия, Пенза, Филиал ВА МТО,

Воротилин Михаил Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, проректор, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чебурков Юрий Викторович, старший преподаватель, chebyrkov@gmail.com, Россия, Пенза, Филиал ВА МТО,

Павлюченко Алина Николаевна, младший научный сотрудник, alo.alina@bk.ru, Россия, Москва, 27 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации,

Ишков Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, asihkov@mail.ru, Россия, Пенза, Пензенский государственный университет

ANALYSIS OF THE BALLISTIC IMPACT OF A BULLET FOR A LAYERED TEST SAMPLE

A.A. Gromov, M.S. Vorotilin, A.N. Pavlyuchenko, Yu.V. Cheburkov, A.S. Ishkov

The analysis of the impact of an object on the test sample is an important aspect of the design related to the impact strength of the material. Based on the review, various parameters affecting the ballistic impact were analyzed. It was found that the parameters having the main impact are the angle, thickness and parameters of the composite material. The impact of a bullet on a layered test sample was tested experimentally and modeled using the finite element method approach.

Key words: dynamic analysis, velocity, bullet, test sample, voltage.

Gromov Alexey Alexandrovich, course officer – teacher (applicant), darkzgrom@gmail.com, Russia. Penza, A Branch of the VA MTO,

Vorotilin Mikhail Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, vice-rector, Russia, Tula, Tula State University,

Cheburkov Yuri Viktorovich, senior lecturer, chebyrkov@gmail.com, Russia, Penza, A Branch of the VA MTO,

Pavlyuchenko Alina Nikolaevna, junior researcher, alo.alina@bk.ru, Russia, Moscow, 27 Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

УДК539.621

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-491-492

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ МИКРОТВЁРДОСТИ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

В.А. Яхимович, А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, Н.Е. Стариков

В статье реализована разработка и экспериментальная проверка математической модели, описывающей зависимость коэффициента трения скольжения от твёрдости покрытий различного состава, нанесённых высокоскоростным газопламенным напылением на бурильные трубы из алюминиевого сплава марки Д16. Проверка реализована посредством регрессионного анализа полученных экспериментальных данных, в результате которого установлена справедливость уточнённой математической модели трения, построенной с использованием молекулярно-механической теории трения.

Ключевые слова: математическая модель трения, бурильная труба, микротвёрдость, карбид вольфрама, износостойкое покрытие.

Применение сложнопрофильных скважин подразумевает увеличение числа интервалов с пространственным искривлением ствола, значительными разворотами по азимуту и появление других факторов, которые негативно сказываются на процессе проводки скважины из-за высоких значений трения, обуславливающих рост момента на вращение, ухудшение доведения плановой нагрузки на долото [1]. Для проводки скважин, которые имеют сложную траекторию, необходим подвод больших энергетических затрат на преодоление сопротивления трения, возникающих между стенкой скважин и бурильной колонной [2]. Кроме того, возникающий большой крутящий момент создаст значительные механические нагрузки на бурильный инструмент и бурильные трубы [3], приводящие к ускорению процесса изнашивания. Для снижения изнашивания и энергетических потерь на трение используют различные покрытия, особенно на бурильные трубы из алюминиевых сплавов.

Реализован широкий круг исследований покрытий различной природы для бурильных труб, показавших свою эффективность [4-8 и др.]. Среди широкого спектра покрытий особенно выделяются покрытия из карбида вольфрама, отличающиеся повышенной износостойкостью. Однако существующие трибологические теории мало используются в исследованиях трения бурильных труб, соответственно закономерностей трения покрытий на основе карбида вольфрама выявлено пока недостаточно для реализации эффективных мероприятий по управлению трением алюминиевых бурильных труб. В границах данной работы выявлена зависимость коэффициента трения от микротвёрдости покрытий на основе карбида вольфрама для алюминиевых бурильных труб, посредством использования молекулярно-механической теории трения.

Математическая модель. Профессор Крагельский И.В. предложил следующую формулу для определения коэффициента трения [9]:

$$f = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + K_x \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где τ_0 – удельная сила трения, обусловленная молекулярным взаимодействием трущихся поверхностей, p_r – фактическое давление, β – пьезокоэффициент молекулярной составляющей трения, h – глубина внедрения неровности, r – радиус закругления вершин неровностей, $K_x = 0,55$ для пластического контакта, $K_x = 0,19\alpha_r$ для упругого контакта, α_r – коэффициент гистерезисных потерь при трении. С другой стороны известно соотношение, выражающее фактическое давление при повторных приложениях нагрузки [10]:

$$p_r = H_V \cdot \left(\frac{F_N}{F_{N0}}\right)^{\frac{1}{v}}, \quad (2)$$

где H_V – микротвёрдость по Виккерсу, F_{N0} – первоначально приложенная нагрузка, F_N – повторно прикладываемая нагрузка, v – параметр степенной аппроксимации 1-го участка опорной кривой профиля. Если при первом приложении нагрузки имеет место пластическая деформация, то при повторном приложении без изменения взаимного расположения поверхностей деформация будет упругой до тех пор, пока нормальная нагрузка F_N не превысит приложенную первоначально F_{N0} [10].

Соответственно, в условиях функционирования пары трения при фиксированной нагрузке $F_N = F_{N0}$ и $p_r = H_V$ формула (1) принимает вид:

$$f = \frac{\tau_0}{H_V} + \beta + K_x \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

В работе [10] приводится аналогичная формула, отличающаяся тем, что в ней используется твёрдость по Бринеллю. Формула (3) по форме близка к формуле Эрнста и Мерченга.

Материалы и методика исследования. Исследованы на трение покрытия на бурильные трубы из алюминиевого сплава Д16, для нанесения которых высокоскоростным газопламенным напылением использовали различные составы, с различными свойствами [11,12,13]:

1) покрытие Р1 состоит из карбида вольфрама 86,70% WC, с дополнительным содержанием 3,1% Cr и 10,2% Co, его микротвёрдость составляет 1133HV.