
Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-101-116

ИСПЫТАНИЯ НА СРЕЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

В.С. Ерасов¹, И.Г. Сибаяев¹, А.И. Сутубалов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведен анализ отечественных и зарубежных методик механических испытаний конструкционных авиационных композиционных материалов и покрытий на срез. Представлены виды оснасток на срез и их основные отличия. Показано развитие методик испытания методами инструментального индентирования и царапанием (склерометрия), при которых разрушение происходит при срезе материала индентором. Представлены типичная диаграмма среза в координатах «нагрузка–перемещение пуансона», диаграммы внедрения и царапания инденторами, фотографии царапины без разрушения и со следами разрушения на деформируемой поверхности.

Ключевые слова: срез, образец, покрытие, деформация, напряжение, разрушение, ламинат, волокно, склерометрия

Для цитирования: Ерасов В.С., Сибаяев И.Г., Сутубалов А.И. Испытания на срез конструкционных авиационных материалов и покрытий // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-101-116.

Scientific article

SLICE TESTING OF STRUCTURAL AVIATION MATERIALS AND COATINGS

V.S. Erasov¹, I.G. Sibayev¹, A.I. Sutubalov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article provides an analysis of domestic and foreign methods of mechanical testing of structural aviation composite materials and coatings on a slice. The types of cross-section fittings and their main differences are presented. The development of testing methods by instrumental indentation and scratching (sclerometry) is shown, in which destruction occurs by cutting the material with an indenter. A typical slice diagram in the coordinates «load–displacement of the punch», diagrams of embedding and scratching with indentors, photographs of scratches without destruction and with traces of destruction on the deformable surface are presented.

Keywords: slice, sample, coating, deformation, stress, fracture, laminate, fiber, sclerometry

For citation: Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I. Slice testing of structural aviation materials and coatings. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-101-116.

Введение

Конструкционные авиационные материалы испытывают на срез для оценки целесообразности изготовления из них шпилек, заклепок, болтов и других деталей крепления, работающих на срез, для определения нагрузки при пробивке отверстий в листах, исследования материалов слоистых покрытий, влияния на них химико-термической обработки и климатических факторов.

С целью получения значений механических характеристик, необходимых для расчетов деталей на прочность, испытания проводят в условиях нагружения, реализующих разрушение образца срезом [1–14], в том числе используют методы испытания вдавливанием индентора и царапанием поверхности образца (склерометрия) алмазной четырехгранной или трехгранной пирамидой, конусом или цилиндром [15–35].

В данной статье приведен анализ методик испытаний на срез по российским и зарубежным стандартам. Показано развитие методик испытания вдавливанием индентора и царапанием.

Приспособления и испытания стандартных макрообразцов

Для испытаний стандартных макрообразцов используют специальные приспособления. Если из материала можно изготовить цилиндрические образцы и детали крепления, их испытывают на двойной срез в приспособлении типа соединения «вилка–проушина» (рис. 1).

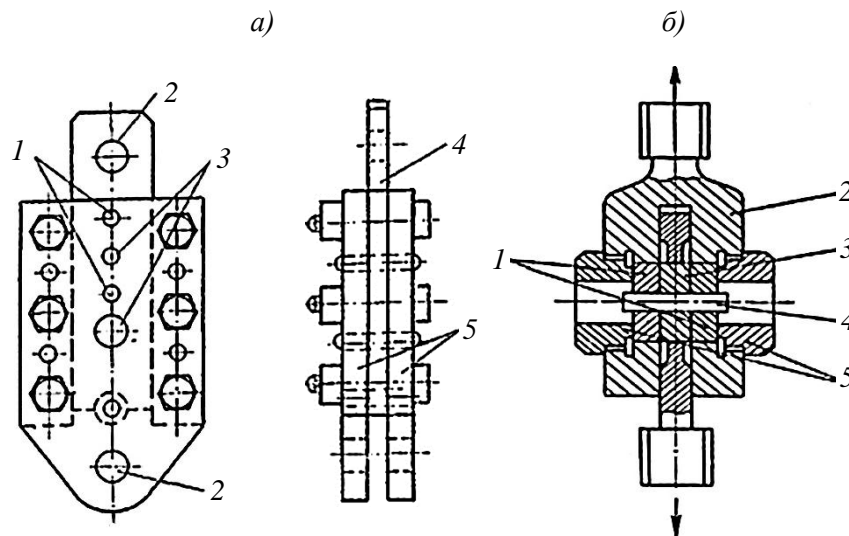


Рис. 1. Схемы приспособлений типа соединения «вилка–проушина» для испытаний на двойной срез: а) 1 – отверстия для удаления выталкивателем частей разрушенного образца; 2 – отверстия для крепления приспособления в захватах испытательной машины; 3 – отверстия для образца; 4 – нож; 5 – щеки; б) 1 – щеки; 2 – корпус; 3 – нож; 4 – образец; 5 – вкладыш [2]

Приведенные на рис. 1 схемы приспособлений предназначены для испытаний на растяжение, но могут быть легко приспособлены и для приложения сжимающих нагрузок. Основные детали приспособлений изготавливают из инструментальной стали высокой твердости с $HRC \geq 60$. Соприкасающиеся поверхности ножей и щек должны быть обработаны шлифованием, по этим поверхностям должна обеспечиваться скользящая посадка по третьему классу точности ($H8/h8$, $H9/h8$, $H9/h9$). Класс посадки регламентирует зазор между щеками и ножом, устанавливаемый при сборке приспособления (рис. 1, а) или регулируемый с помощью вкладышей 5 (рис. 1, б). Точность

изготовления отверстий должна соответствовать третьему классу в системе отверстий ($H8, H9$). Диаметр отверстий должен превышать диаметр образца не более чем на 0,1 мм. Установка образца в отверстие с натягом не допускается.

Толщину ножей и щек регламентируют в зависимости от диапазона диаметров образцов – например, для диаметров от 8 до 12 мм толщина ножа должна составлять 12 мм, а каждой щеки: 8 мм.

Стандарт [7] предусматривает использование приспособления с открытой матрицей (рис. 2), включающего основание (рис. 2, a, z) для размещения в нем матрицы (рис. 2, $a, в$), в которой перемещается нож (рис. 2, $б$). В матрице вместо отверстия для цилиндрического образца (болта) выполнен ложемент полуцилиндрической формы. Нож также имеет гнездо под образец в форме полуцилиндрического ложемента. Для каждого диаметра образца назначают свой диаметр ложементов в матрице и ноже. Толщина ножа равна диаметру образца, толщины щек матрицы равны половине диаметра образца. Максимальный зазор между ножом и щеками матрицы 0,08 мм. Диаметр ложемента не должен превышать номинальный диаметр образца более чем на 0,03 мм. Установлены требования по допускам размеров и расположения конструктивных элементов для обеспечения жесткости конструкции. Регламентированы требования к режущим кромкам и максимальной ширине образующейся при изнашивании фаски. После достижения установленного износа кромок необходимо провести переточку деталей.

Основным преимуществом приспособления является простота подготовки и проведения испытания. Однако выполнение матрицы в форме открытого полуцилиндрического ложемента снижает жесткость крепления образца и допускает его изгиб в процессе приложения нагрузки.

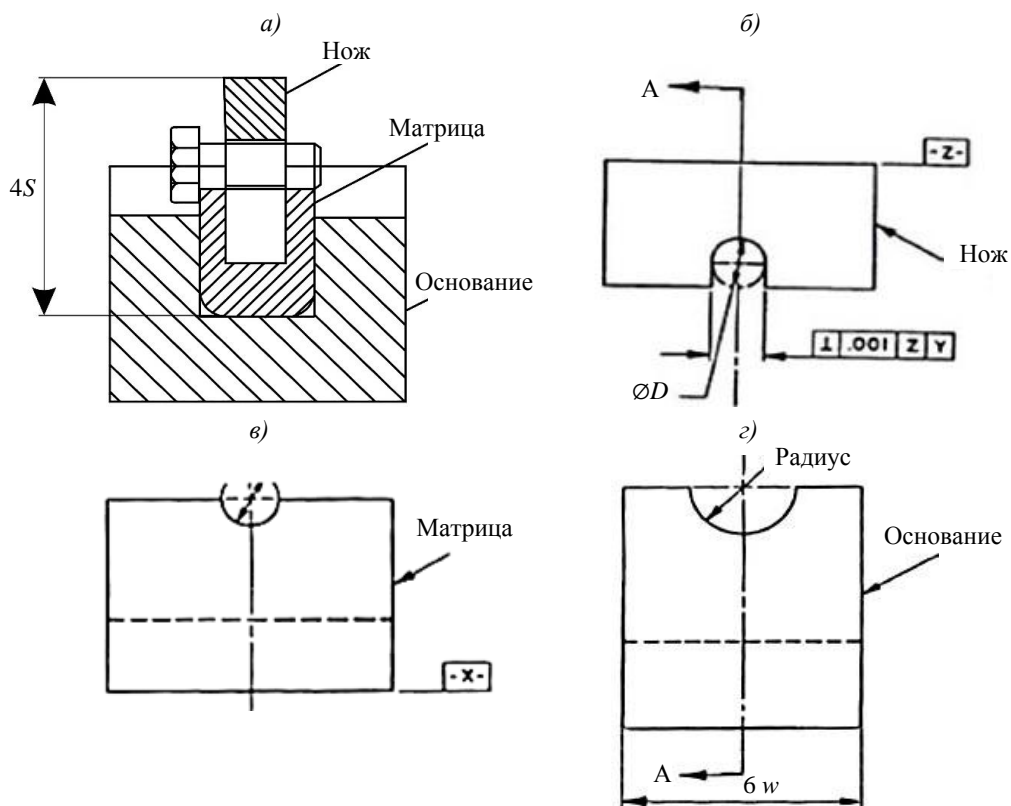


Рис. 2. Схема приспособления с открытой матрицей: общий вид (a) и вид сбоку ножа ($б$), матрицы ($в$) и обоймы матрицы (z) [1]

Сопротивление двойному срезу определяют по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = 2P/\pi d^2, \quad (1)$$

где P – наибольшая нагрузка при испытании, Н; d – исходный диаметр образца, м.

Величина $\tau_{\text{ср}}$ зависит от условий испытания: на нее влияет вид и качество используемого приспособления, скорость нагружения или перемещения активной траверсы испытательной машины. Условия испытаний должны регламентироваться. Стандарты устанавливают скорость перемещения ножа относительно щек не более 10 мм/мин в стандарте [6] и не более 19 мм/мин и обеспечение скорости роста напряжения не более 689 МПа/мин в стандартах [10, 11].

Образцы вырезают механическим способом из полуфабриката или готового крепежного изделия. Они должны иметь стабильные размеры, предусмотренные стандартами на испытания (диаметр образца может меняться от 2 до 25 мм). Такие дефекты, как следы резца, царапины, вмятины, трещины, чернота и окалина, недопустимы. Возможны испытания самих крепежных изделий: болтов, винтов, шпилек.

Испытание на двойной срез предпочтительнее испытания на одинарный срез, реализуемый в приспособлении, имитирующем соединение пластин внахлест (рис. 3). При одинарном срезе сильнее проявляется влияние изгиба, а следовательно, влияние возникающих от него нормальных напряжений. На одинарный срез испытывают детали крепления, длина которых не позволяет использовать приспособления для двойного среза.

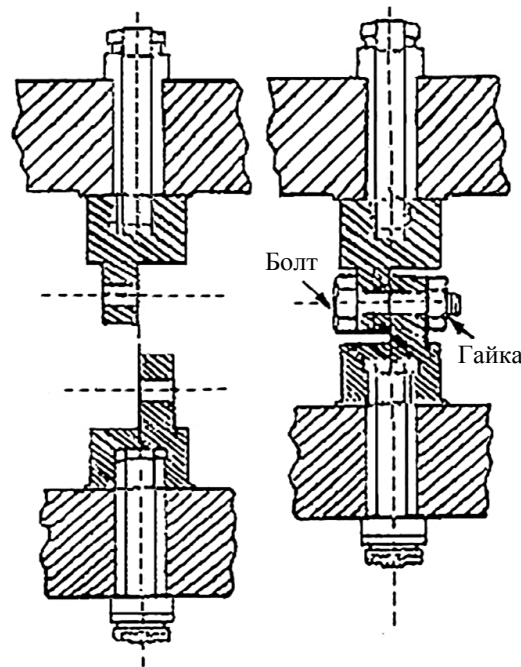


Рис. 3. Схема приспособления для испытания на одинарный срез [2]

Сопротивление одинарному срезу определяют по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = 4P/\pi d^2, \quad (2)$$

где P – наибольшая нагрузка при испытании, Н; d – исходный диаметр образца, м.

Для оценки сопротивления срезу по толщине пластины проводят испытания на срез по круговому контуру в приспособлениях, схемы которых приведены в источниках [2, 3, 11–13]. Одна из схем представлена на рис. 4. Образец в форме круглой или

квадратной пластинки продавливают цилиндрическим пуансоном с плоским торцом через матрицу с круглым отверстием. Фиксирующее кольцо позволяет установить образец в положение, симметричное относительно отверстия, и ограничивает боковое перемещение образца.

В приспособлениях, рекомендуемых стандартами [11, 12], пластину крепят к пуансону. В патенте [13] устранены такие недостатки приспособлений, как их конструктивная сложность, а также высокая трудоемкость при эксплуатации. В результате перекоса плит приспособления может заклинивать в процессе сборки-разборки из-за маленьких зазоров между штоками нижней плиты и стенками отверстий под них в верхней плите, а также из-за небольшой толщины верхней плиты. Приспособления имеют много поверхностей, требующих точной обработки, минимальные допуски формы и размеров при выполнении отверстий, штоков и пуансона.

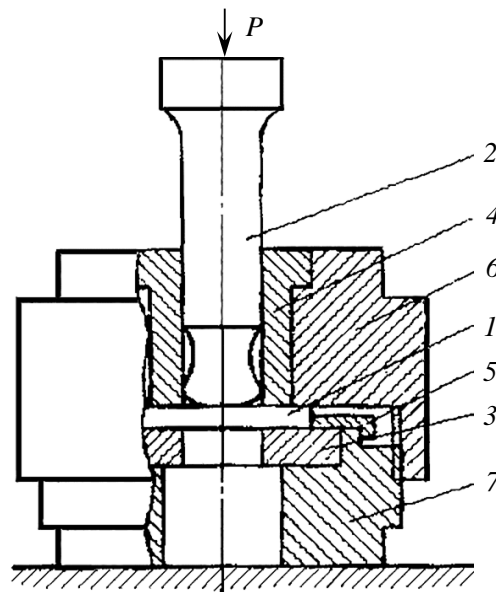


Рис. 4. Схема приспособления для испытания на срез листа по круговому контуру: 1 – образец; 2 – пуансон; 3 – матрица; 4 – направляющая втулка; 5 – фиксирующее кольцо; 6 – прижимная гайка; 7 – основание [3]

Конструкция приспособления, представленная на рис. 5, повышает точность сборки приспособления и за счет этого – стабильность результатов испытаний. Приспособление содержит срезающий пуансон 2, свинчиваемые по резьбе матрицу 5 и прижим б, отверстие 9 в пуансоне с болтом 3 для крепления образца 1, центрирующие пояски 7 и 8, прижим имеет выступ 14 в верхней части.

Согласно справочному пособию [3], оптимальными соотношениями размеров образца и элементов приспособления являются: $d/h = 4 \div 10$ (где d – диаметр пуансона; h – толщина образца); радиус скругления кромки пуансона $r = (0,012 \div 0,025) \cdot d/2$; зазор между пуансоном и матрицей – не более 0,1 мм.

Типичная диаграмма деформирования листа в координатах «нагрузка P – перемещение пуансона Δh » представлена на рис. 6. Диаграмма при пластичном срезе гладкая и похожа на диаграмму растяжения: имеет участок упругого деформирования (до точки P_T), участки упрочнения (от точки P_T до точки P_B) и разупрочнения (от точки P_B до точки P_K). Диаграмма среза композиционного слоистого малопластичного материала может иметь скачки по нагрузке, вызванные разным сопротивлением срезу отдельных слоев.

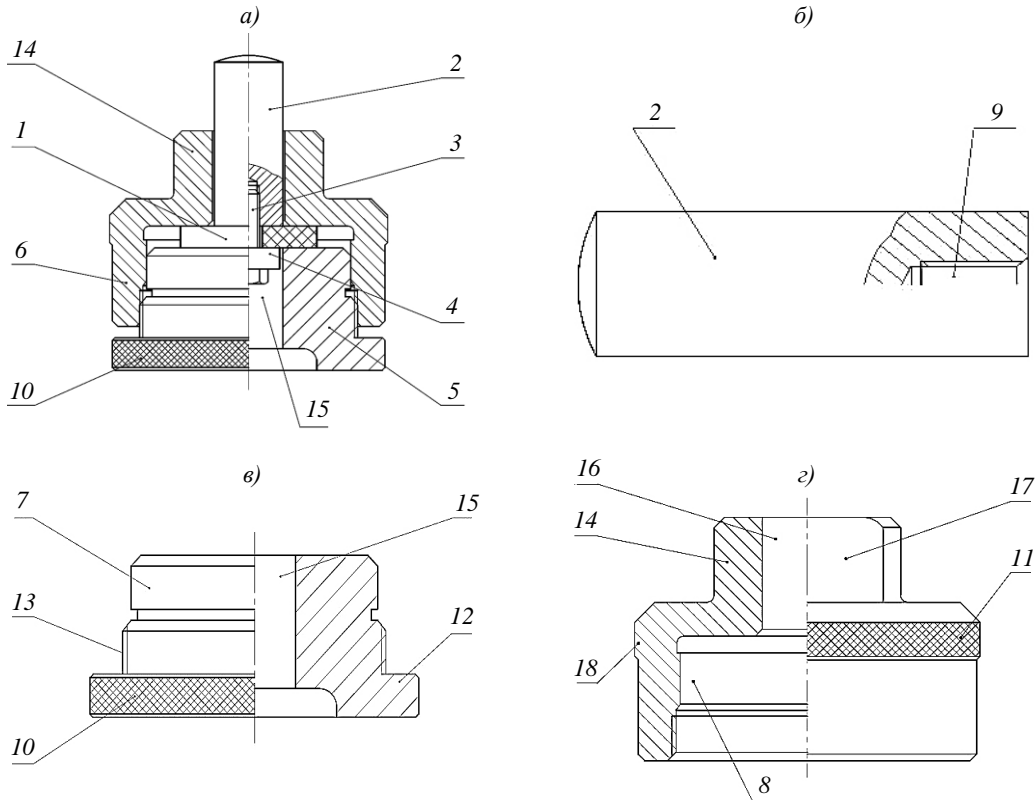


Рис. 5. Конструкция приспособления для испытания пластин на срез: устройство в сборе (а); срезающий пуансон (б); матрица (в); прижим (г); элементы: 1 – образец для испытания; 2 – срезающий пуансон; 3 – болт; 4 – шайба; 5 – матрица; 6 – прижим; 7 – центрирующий поясok матрицы; 8 – центрирующий поясok прижима; 9 – отверстие с резьбой для болта; 10 – рифление на внешней поверхности матрицы; 11 – рифление на внешней поверхности прижима; 12 – буртик с рифлением на матрице; 13 – резьба; 14 – выступ в верхней части прижима; 15 – центральное отверстие матрицы; 16 – центральное отверстие прижима; 17 – лыски под ключ; 18 – буртик с рифлением на прижиме [13]

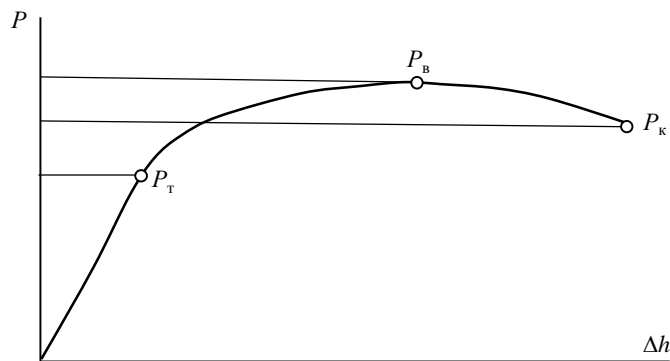


Рис. 6. Типичная диаграмма деформирования листа при испытании на срез по круговому контуру [2]

Сопротивление при испытании на срез по круговому контуру определяют по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = P_{\text{в}} / \pi dh, \quad (3)$$

где $P_{\text{в}}$ – наибольшая нагрузка при испытании, Н; d – диаметр пуансона, м; h – толщина образца, м.

Испытания образцов проводят, как правило, на универсальных испытательных машинах, обеспечивающих нагружение образцов по схеме одноосного растяжения или сжатия и измерение нагрузки с погрешностью не более $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Для металлических пластичных материалов сопротивление срезам можно определить пересчетом по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = K \cdot \sigma_{\text{в}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – прочность (предел прочности, временное сопротивление) при растяжении, МПа; K – коэффициент: 0,55 – для алюминиевых сплавов; 0,56 – для титановых сплавов; 0,63 – для сталей с $\sigma_{\text{в}} = 800\text{--}1200$ МПа; 0,70 – для сталей с $\sigma_{\text{в}} \leq 800$ МПа [15].

Для композиционных авиационных материалов такая практика пересчета отсутствует. Поэтому целесообразна актуализация стандарта [6] или разработка нового стандарта с унифицированными требованиями к приспособлениям и условиям испытания.

Испытания на срез от макро- до наноуровня

Прогресс материаловедения определяют экспериментальные и теоретические исследования, базирующиеся на высокой квалификации ученых, развитых приборной и испытательной базах. Необходимость определения механических свойств малых объемов материала: тонких и сверхтонких пленок, границ раздела в композиционных материалах, поверхностей толщиной в несколько атомных слоев, отдельных структурных составляющих – вызвала развитие метода инструментального индентирования, его соединение с испытанием царапанием, при котором материал деформируют и разрушают алмазным индентором [16–33, 36–42].

Разработаны прецизионные универсальные испытательные машины малых размеров с компьютерным управлением нагружением исследуемого образца и регистрацией многочисленных изучаемых параметров (рис. 7). Машины позволяют проводить «мягкое» (управление нагрузкой) и «жесткое» (управление деформацией) нагружения. При испытании определяют коэффициент трения, характеристики шероховатости поверхности, характеристики инструментального индентирования и царапания, акустическую эмиссию, а также проводят оптическую и атомно-силовую микроскопию. Каждый показатель регистрируют с высокой (несколько тысяч герц) частотой и синхронизируют между собой [43–50].

Испытания и исследования проводят по стандартам. Следует отметить тот факт, что стандартизация таких исследований пока отстает от возможностей испытательных машин малых размеров. Ограничение связано с высокой стоимостью, сложностью применения и обслуживания машин. В настоящее время универсальные испытательные машины малых размеров можно встретить в основном в исследовательских лабораториях вузов и НИИ.

Показатели среза на этих машинах пока не определяют. Причина этого – отсутствие теоретических основ для выделения из показателей твердости значений срезающих касательных напряжений. В данной статье такая попытка сделана и выведены формулы для расчета напряжения среза от макро- до наноуровня.

Твердость – свойство материала сопротивляться проникновению в него другого упругого жесткого тела, которое при этом не получает остаточных деформаций. В зависимости от нагружаемого объема материала разделяют макро-, микро- и нанотвердость. Применяют различные способы определения твердости материала образцов и изделий для характеристики их механических свойств. На поверхность материалов

воздействуют наконечниками из закаленной стали или алмаза, а также твердого сплава в форме шара, конуса, пирамиды, цилиндра с плоским дном. Величина твердости и ее размерность для одного и того же материала зависят от применяемого метода измерения. Пересчет значений твердости, определяемой разными методами, производится по таблицам и эмпирическим формулам.

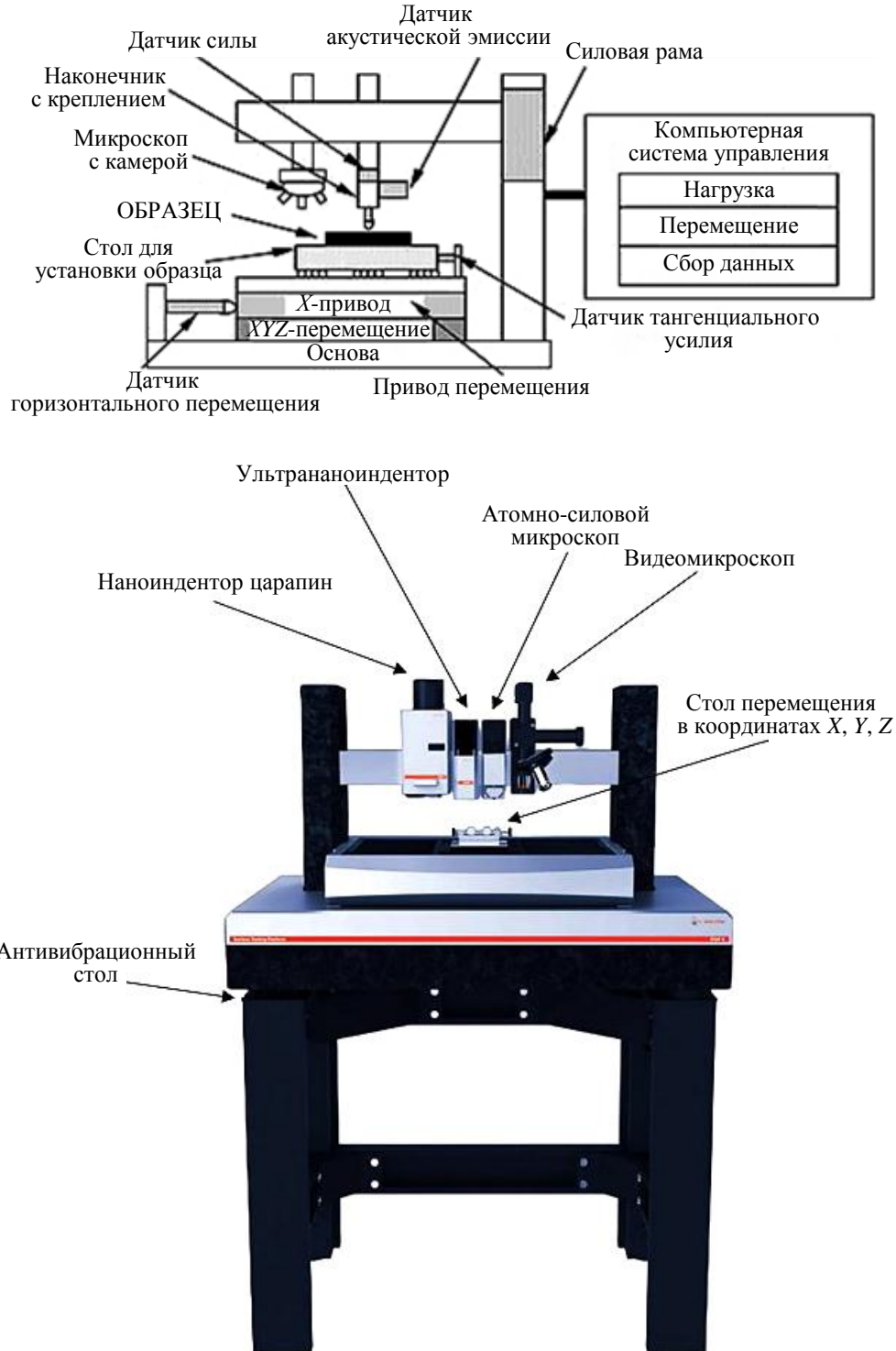


Рис. 7. Схема и внешний вид прецизионной универсальной испытательной машины малых размеров с компьютерным управлением нагружением исследуемого образца [40, 50]

Считается, что твердость является характеристикой сопротивления материалов малой упругопластической деформации. Однако развитие метода инструментального индентирования позволило проследить весь деформационный путь нагружения от упругой деформации до деформации разрушения. Большой вклад в развитие метода внесли отечественные материаловеды (Е.С. Беркович, С.И. Булычев, В.П. Алехин, А.П. Терновский, М.М. Хрущев, М.Х. Шоршоров и др.) [2, 3, 46]. Метод лежит в основе международных и отечественных стандартов [16, 18–28, 36–40]. В процессе инструментального индентирования у образца появляется новая свободная поверхность в результате пластической деформации и разрушения.

При измерении твердости методом царапания происходят не только упругая и пластическая деформации испытываемого материала, но и его местное разрушение. Твердость, определенная царапанием, связана с сопротивлением материала срезу. Диаграмма сдвига на рис. 6 демонстрирует вклады упругой и пластической частей деформации в напряжение среза. Упругая деформация вносит существенный вклад (не менее 50 %) в величину напряжения среза. Остальную часть определяет процесс реализации пластической деформации. Если упрочнения не происходит, то диаграмма сдвига имеет постоянную величину нагрузки P на участке развития пластической деформации, вклад пластической деформации незначителен, поэтому им можно пренебречь. В случае пластического упрочнения этот вклад необходимо учитывать.

Классические решения задачи внедрения индентора в упругое полупространство [2, 3, 17, 33, 41] показывают наличие в упругом теле мест, в которых должно возникать очень высокое напряжение (сингулярные контакты). В реальных материалах в этих местах появляется пластическая деформация и начинается разрушение. Напряженно-деформированное состояние материала под индентором и рядом с ним – объемное и зависит от формы индентора. На рис. 8 представлена схема внедрения инденторов разной формы в изотропный материал. Наиболее привлекательным индентором, при внедрении которого получают линейные зависимости на упругом участке $A_c(h)$, $P(h)$, $S(h)$, $p_m(h)$, является цилиндр с плоским дном. При появлении пластической деформации или среза на прямых $A_c(h)$, $P(h)$, $S(h)$, $p_m(h)$ должны возникнуть точки перелома. Напряжение среза можно определять по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = Ap_m^n, \quad (5)$$

где A – постоянная материала; p_m^n – значение среднего контактного давления в точке перелома на прямых при минимальном значении нагрузки P_n .

После внедрения индентора проводят процесс царапания. Фиксируют глубину внедрения h , измеряют силу вдавливания P и горизонтальную силу P_r ,двигающую индентор. Можно царапать при фиксируемой или линейно возрастающей силе вдавливания P с замером глубины внедрения h и горизонтальной силы P_r [37]. На рис. 9 представлены типичные результаты испытания царапанием лакокрасочного покрытия. Микроскопия позволяет оценить и измерить следы царапания (рис. 10). Они могут быть результатом только пластической деформации, т. е. получены при вдавливании путем пластического деформирования материала без его отделения; результатом резания материала с отделением стружки или хрупкого разрушения с диспергированием и скалыванием материала. Наличие того или иного механизма царапания зависит не только от исследуемого материала, но и от величины нагрузки на индентор, формы и материала индентора, скорости нанесения царапины и др.

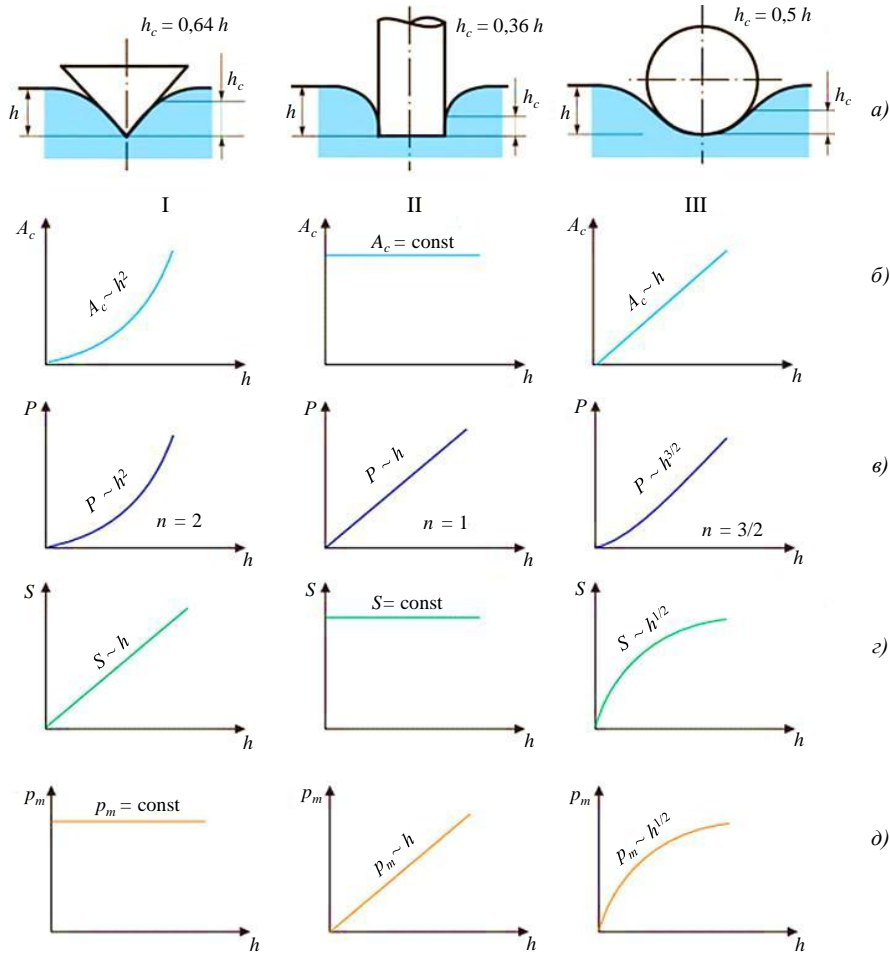


Рис. 8. Схема индентирования изотропного материала: I – острым конусом; II – цилиндром с плоским дном; III – сферой; а – сечение в плоскости симметрии пятна контакта; зависимости от глубины внедрения h площади контакта A_c (б); силы вдавливания P (в); контактной жесткости S (г) и среднего контактного давления p_m (д); h_c – контактная глубина [17]

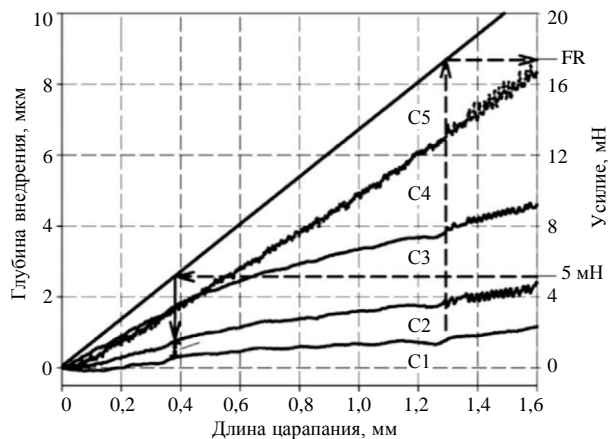


Рис. 9. Результаты испытания царапанием на наноинденторе: C1 – вертикальное перемещение слегка нагруженного индентора перед началом царапания с целью определения топографии поверхности образца; C2 – вертикальное перемещение слегка нагруженного индентора по следу от царапания; C3 – вертикальное перемещение нагружаемого индентора в процессе царапания; C4 – изменение горизонтальной силы в процессе царапания; C5 – управление вертикальной силой в процессе царапания [39]

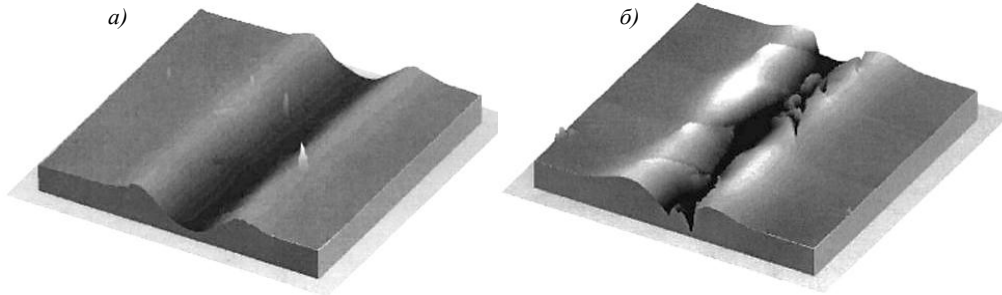


Рис. 10. Фотографии царапины без разрушения (а) и со следами разрушения на деформируемой поверхности (б) [39]

Напряжение среза следует определять при наличии механизма разрушения срезом по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = B P_{\Gamma}^{\text{max}} / S, \quad (6)$$

где B – постоянная материала; P_{Γ}^{max} – максимальное значение горизонтальной силы; S – боковая контактная поверхность индентора, на которую действует сила P_{Γ}^{max} .

Обсуждение и заключения

Обзор отечественных и зарубежных методик механических испытаний конструкционных авиационных композиционных материалов и покрытий на срез показал, что параллельно с развитием традиционных методик для испытаний металлических материалов появляются новые методики, базирующиеся на современных прецизионных универсальных испытательных машинах малых размеров с компьютерным управлением нагружением образца и регистрацией многочисленных изучаемых параметров. Машины позволяют проводить «мягкое» и «жесткое» нагружения. При испытании определяют коэффициент трения, характеристики шероховатости поверхности, инструментального индентирования и царапания, а также акустическую эмиссию; проводят оптическую и атомно-силовую микроскопию. Каждый показатель регистрируют с высокой (несколько тысяч герц) частотой и синхронизируют между собой [40, 50].

Использование индентора в виде цилиндра с плоским дном позволяет получать линейные зависимости характеристик индентирования от глубины внедрения, что упрощает определение напряжения среза.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Список источников

1. Лавров А.В., Ерасов В.С., Дьяченко О.А. Сравнительный анализ отечественной и зарубежных методик испытания на двойной срез болтов авиационного назначения // Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам: ежемесячное приложение к журналу «Все материалы. Энциклопедический справочник». 2013. № 11. С. 2–7.
2. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Механические испытания и свойства конструкционных авиационных металлических материалов: учебное пособие / под. общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 344 с.
3. Методы испытаний контроля и исследования машиностроительных материалов: справ. пособие в 3 т. / под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1974. Т. II: Методы исследования механических свойств металлов. С. 45–49.

4. ОСТ 1 31101–80. Болты, винты и шпильки. Технические условия М., 1980. 28 с. URL: <https://standartgost.ru> (дата обращения: 16.07.2024).
5. ОСТ 1 00552–72. Болты, винты из титанового сплава. Технические условия. М., 1972. 16 с. URL: <https://standartgost.ru> (дата обращения: 16.07.2024).
6. ОСТ 1 90148–74. Металлы. Метод испытания на срез. М., 1975. 8 с. URL: <https://standartgost.ru> (дата обращения: 16.07.2024).
7. MIL-STD-1312/13A. Fastener Test Methods. Method 13. Double Shear Test. Department of Defense of the USA. Washington. 1997. 10 p.
8. MIL-STD-1312-20. Fastener Test Method. Method 20. Single Shear. Aerospace Industries Association of America Inc., 1997. 14 p.
9. ASTM F606/F606M-2016. Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets. American Society for Testing and Materials, 2013. 19 p.
10. ASTM B565-04. Standard Test Method for Shear Testing of Aluminum and Aluminum-Alloy Rivets and Cold-Heading Wire and Rods. American Society for Testing and Materials, 2015. 5 p.
11. ASTM B831-19. Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products. American Society for Testing and Materials, 2019. 5 p.
12. ГОСТ Р 57968–2017. Композиты полимерные. Метод испытания образцов на срез. М.: Стандартинформ, 2018. 15 с.
13. Устройство для испытаний пластмасс на срез: пат. RU 167675 U1 Рос. Федерация; заявл. 04.08.16; опубл. 10.01.17.
14. ASTM D732-17. Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool. American Society for Testing and Materials, 2010. 4 p.
15. Коновалов В.В. Методология аттестации конструкционных металлических материалов планера самолета // Труды ЦАГИ. 2013. Вып. 2725. С. 21–80.
16. ГОСТ 21318–75. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. М.: Изд-во стандартов, 1976. 30 с.
17. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства материалов в субмикро- и наномасштабе. Недавние результаты и достижения (Обзор) // Физика твердого тела. 2021. Т. 63. Вып. 1. С. 3–42. DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171.
18. ISO 14577-1:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method. International Organization for Standardization, 2015. 54 p.
19. ISO 14577-2:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 2: Verification and calibration of testing machines. International Organization for Standardization, 2015. 32 p.
20. ISO 14577-3:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 3: Calibration of reference blocks. International Organization for Standardization, 2015. 16 p.
21. ISO 14577-4:2016. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings. International Organization for Standardization, 2016. 26 p.
22. ASTM D7027-20. Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine, American Society for Testing and Materials, 2020. 9 p.
23. ASTM E2546-15. Standard Practice for Instrumented Indentation Testing, American Society for Testing and Materials, 2023. 23 p.
24. ASTM G171-03. Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus, American Society for Testing and Materials, 2017. 7 p.
25. ГОСТ Р 56232–2014. Определение диаграммы «напряжение–деформация» методом инструментального индентирования шара. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2018. 41 с.
26. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577-1:2002). Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. М.: Стандартинформ, 2018. 28 с.

27. ГОСТ Р 8.904–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров. М.: Стандартиформ, 2018. 30 с.
28. ГОСТ Р 8.907–2015. Государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования. М.: Стандартиформ, 2018. 8 с.
29. Марченков А.Ю., Терентьев Е.В. Масштабный эффект при испытаниях царапанием материалов с разным деформируемым объемом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 9. С. 66–69.
30. Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. и др. Склерометрический метод измерения микротвердости фоторезиста на кремнии // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7. № 1. С. 77–84. DOI: 10.21122/2220-9506-7-1-77-84.
31. Львова Н.А., Кравчук К.С., Широков И.А. Алгоритмы обработки изображений царапин в методе склерометрии // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. Вып. 8. С. 1570–1577.
32. Усеинов А., Решетов В., Маслеников И., Кравчук К. ISO – это просто! // Наноиндустрия. 2015. № 7. С. 52–60.
33. Усеинов С.С. Измерение твердости конструкционных материалов методами индентирования и склерометрии на субмикронном и нанометровом масштабах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ФГУ ТИСНУМ, 2010. 27 с.
34. Сутубалов А.И., Подживотов Н.Ю., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Оценка однородности физико-механических свойств полуфабрикатов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). Ст. 10. URL: <http://www.jornal.viam.ru> (дата обращения: 17.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
35. Ерасов В.С., Сibaев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.jornal.viam.ru> (дата обращения: 19.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
36. EN 1071-3. Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coating – Part 3: Determination of adhesion and other mechanical failure modes by scratch test. European committee for standardization, 2005. 11 p.
37. ISO 20502-2005(E). Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of adhesion of ceramic coatings by scratch testing. International Organization for Standardization, 2005. 8 p.
38. ISO 1518-1:2023(E). Paints and varnishes – Determination of scratch resistance – Part 1: Constant-loading method. International Organization for Standardization, 2005. 6 p.
39. ASTM D7187-20. Standard Test Method for Measuring Mechanistic Aspects of Scratch/Mar Behavior of Paint Coatings by Nanoscratching, American Society for Testing and Materials, 2020. 12 p.
40. ASTM C1624-22. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing, American Society for Testing and Materials, 2022. 28 p.
41. Снарский А.С., Крыленко А.В. Определение физико-механических характеристик материала методом неразрушающего контроля // Фундаментальные науки. Механика. 2005. № 10. С. 133–137.
42. Гоголинский К.В., Сясько В.А. Методы и средства контроля механических свойств микро- и нанометровых покрытий и модифицированных приповерхностных слоев. URL: <https://ntcexpert.ru/documents/metody-pokrytij.pdf?ysclid=lwkg18gy4p195748077> (дата обращения: 19.07.2024).
43. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Нано- и микротвердость твердых тел – современные проблемы // Вестник ТГУ. 2000. Т. 5. Вып. 2–3. С. 251–253.
44. Беркович Е.С., Крапошина Л.Б. Новый прибор ИМАШ – глубиномер интерференционный – для испытания на микротвердость по глубине отпечатка // Новое в области испытаний на микротвердость. М.: Наука, 1974. С. 93–100.
45. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Уткин Д.А., Автаева Я.В. Оборудование для определения физико-механических характеристик материалов методом вдавливания (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-107-124.

46. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Уткин Д.А. Методы определения механических характеристик материалов с помощью индентирования (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
47. Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Чижик С.А., Гринчук П.С. Определение трещиностойкости с использованием АСМ // Сб. докл. XIII Междунар. конф. «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии». Минск, 2018. С. 260–266.
48. Шершак П.В., Сутубалов А.И., Яковлев Н.О., Шерстюк Ф.А. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 2. Сжатие // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 12. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. (дата обращения: 19.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
49. Монахов А.Д., Гуляев М.М., Гладышева Н.Е., Коптельцева О.Ю., Автаев В.В., Яковлев Н.О., Гулина И.В. Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в истинных координатах // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2023. Т. 29. № 3. С. 79–88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88.
50. Anton Paar Scratch Testers. URL: <http://www.anton-paar.com>. (дата обращения: 19.07.2024).

References

1. Lavrov A.V., Yerasov V.S., Dyachenko O.A. Comparative analysis of domestic and foreign methods of double shear testing of aviation bolts. *Kommentarii k standartam, TU, sertifikatam: yezhemesyachnoye prilozheniye k zhurnalu «Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik»*, 2013, no. 11, pp. 2–7.
2. Erasov V.S., Oreshko E.I. *Mechanical testing and properties of structural aircraft metal materials: a tutorial*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 344 p.
3. *Methods of testing, monitoring and research of engineering materials: a reference in 3 vols*. Ed. A.T. Tumanov. Moscow: Mashinostroenie, 1974, vol. II: Methods of studying mechanical properties of metals, pp. 45–49.
4. Industry standard 1 31101–80. *Bolts, screws and studs. Specifications*. Moscow, 1980, 28 p. Available at: <https://standartgost.ru> (accessed: July 16, 2024).
5. Industry standard 1 00552–72. *Bolts, screws made of titanium alloy*. Technical conditions. Moscow, 1972, 16 p. Available at: <https://standartgost.ru> (accessed: July 16, 2024).
6. Industry standard 1 90148–74. *Metals. Shear Test Method*. Moscow, 1975, 8 p. Available at: <https://standartgost.ru> (accessed: July 16, 2024).
7. MIL-STD-1312/13A. *Fastener Test Methods. Method 13. Double Shear Test*. Department of Defense of the USA. Washington. 1997, 10 p.
8. MIL-STD-1312-20. *Fastener Test Method. Method 20. Single Shear*. Aerospace Industries Association of America, Inc., 1997, 14 p.
9. ASTM F606/F606M-2016. *Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets*. American Society for Testing and Materials, 2013, 19 p.
10. ASTM B565-04. *Standard Test Method for Shear Testing of Aluminum and Aluminum-Alloy Rivets and Cold-Heading Wire and Rods*. American Society for Testing and Materials, 2015, 5 p.
11. ASTM B831-19. *Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products*. American Society for Testing and Materials, 2019, 5 p.
12. State Standard R 57968–2017. *Polymer composites. Method for testing samples for shear*. Moscow: Standartinform, 2018, 15 p.
13. *Device for testing plastics for shear*: pat. RU 167675 U1 Russian Federation; appl. 04.08.16; publ. 10.01.17.
14. ASTM D732-17. *Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool*. American Society for Testing and Materials, 2010, 4 p.
15. Konovalov V.V. Methodology for certification of structural metal materials of aircraft airframes. *Trudy TSAGI*, 2013, is. 2725, pp. 21–80.
16. State Standard 21318–75. *Microhardness measurement by scratching with diamond tips*. Moscow: Publ. House of Standards, 1976, 30 p.

17. Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of materials at the submicro- and nanoscale. Recent results and achievements (Review). *Fizika tverdogo tela*, 2021, vol. 63, is. 1, pp. 3–42. DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171.
18. ISO 14577-1:2015. *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method*. International Organization for Standardization, 2015, 54 p.
19. ISO 14577-2:2015. *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 2: Verification and calibration of testing machines*. International Organization for Standardization, 2015, 32 p.
20. ISO 14577-3:2015. *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 3: Calibration of reference blocks*. International Organization for Standardization, 2015, 16 p.
21. ISO 14577-4:2016. *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings*. International Organization for Standardization, 2016, 26 p.
22. ASTM D7027-20. *Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine*. American Society for Testing and Materials, 2020, 9 p.
23. ASTM E2546-15. *Standard Practice for Instrumented Indentation Testing*. American Society for Testing and Materials, 2023, 23 p.
24. ASTM G171-03. *Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus*. American Society for Testing and Materials, 2017, 7 p.
25. State Standard R 56232–2014. *Determination of the stress-strain diagram by the instrumental indentation of a ball. General requirements*. Moscow: Standartinform, 2018, 41 p.
26. State Standard R 8.748–2011 (ISO 14577-1:2002). *State system for ensuring the uniformity of measurements. Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials by instrumental indentation. Part 1. Test method*. Moscow: Standartinform, 2018, 28 p.
27. State Standard R 8.904–2015. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurement of hardness and other characteristics of materials by instrumental indentation. Part 2. Verification and calibration of hardness testers*. Moscow: Standartinform, 2018, 30 p.
28. State Standard R 8.907–2015. *State verification scheme for hardness measuring instruments according to the Martens and indentation scales*. Moscow: Standartinform, 2018, 8 p.
29. Marchenkov A.Yu., Terentyev E.V. Scale effect in scratch tests of materials with different deformable volumes. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 9, pp. 66–69.
30. Brinkevich D.I., Prosolovich V.S., Yankovsky Yu.N. et al. Sclerometric method for measuring the microhardness of photoresist on silicon. *Pribory i metody izmereniy*, 2016, vol. 7, no. 1. 77–84. DOI: 10.21122/2220-9506-7-1-77-84.
31. Lvova N.A., Kravchuk K.S., Shirokov I.A. Algorithms for processing scratch images in the sclerometry method. *Fizika tverdogo tela*, 2013, vol. 55, is. 8, pp. 1570–1577.
32. Useinov A., Reshetov V., Maslenikov I., Kravchuk K. ISO is easy! *Nanoindustriya*, 2015, no. 7, pp. 52–60.
33. Useinov S.S. *Measuring the hardness of structural materials by indentation and sclerometry methods on the submicron and nanometer scales*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: FGU TISNUM, 2010, 27 p.
34. Sutubalov A.I., Podzhivotov N.Yu., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Evaluation of homogeneity of physical and mechanical properties of semi-finished products for aviation purpose. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
35. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
36. EN 1071-3. *Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coating – Part 3: Determination of adhesion and other mechanical failure modes by scratch test*. European committee for standardization, 2005, 11 p.

37. ISO 20502-2005(E). *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of adhesion of ceramic coatings by scratch testing*. International Organization for Standardization, 2005, 8 p.
38. ISO 1518-1:2023(E). *Paints and varnishes – Determination of scratch resistance – Part 1: Constant-loading method*. International Organization for Standardization, 2005, 6 p.
39. ASTM D7187-20. *Standard Test Method for Measuring Mechanistic Aspects of Scratch/Mar Behavior of Paint Coatings by Nanoscratching*. American Society for Testing and Materials, 2020, 12 p.
40. ASTM C1624-22. *Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing*. American Society for Testing and Materials, 2022, 28 p.
41. Snarsky A.S., Krylenko A.V. Determination of physical and mechanical characteristics of a material by non-destructive testing. *Fundamentalnye nauki. Mekhanika*, 2005, no. 10, pp. 133–137.
42. Gogolinsky K.V., Syasko V.A. *Methods and means for monitoring mechanical properties of micro- and nanometer coatings and modified surface layers*. Available at: <https://ntcexpert.ru/documents/metody-pokrytij.pdf?ysclid=lwkg18gy4p195748077> (accessed: July 19, 2024).
43. Golovin Yu.I., Tyurin A.I. Nano- and microhardness of solids – modern problems. *Vestnik TGU*, 2000, vol. 5, is. 2–3, pp. 251–253.
44. Berkovich E.S., Kraposhina L.B. New IMASH device – interference depth gauge – for testing microhardness by indentation depth. *New in the field of microhardness testing*. Moscow: Nauka, 1974, pp. 93–100.
45. Oreshko E.I., Erasov V.S., Utkin D.A., Avtayeve Ya.V. The equipment for definition of physicomaterial characteristics of materials by press-in method (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-107-124.
46. Oreshko E.I., Erasov V.S., Yakovlev N.O., Utkin D.A. Methods for determining the mechanical characteristics of materials using indentation (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
47. Lapitskaya V.A., Kuznetsova T.A., Chizhik S.A., Grinchuk P.S. Determination of crack resistance using AFM. *Reports XIII Int. Conf. «Methodological aspects of scanning probe microscopy»*. Minsk, 2018, pp. 260–266.
48. Shershak P.V., Sutubalov A.I., Yakovlev N.O., Sherstyuk F.A. Standards test methods for polymer matrix composite materials. Part 2. Compression properties. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
49. Monakhov A.D., Gulyaev M.M., Gladysheva N.E., Kopteltseva O.Yu., Avtaev V.V., Yakovlev N.O., Gulina I.V. Application of the digital image correlation method for constructing deformation diagrams in true coordinates. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 79–88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88.
50. *Anton Paar Scratch Testers*. Available at: <http://www.anton-paar.com> (accessed: July 19, 2024).

Информация об авторах

Ерасов Владимир Сергеевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сибяев Илья Гоярович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сутубалов Александр Игоревич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladimir S. Erasov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya G. Sibayev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander I. Sutubalov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.10.2024.

The article was submitted 11.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 22.10.2024.