

УДК 539.21:539.12.04; 538.951-405

SHEAR PUNCH – НОВЫЙ ПРИБОР И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гусев М.Н., Максимкин О.П., Матесов Д.С., Чакров П.В.

Институт ядерной физики

Изготовлен прибор и внедрена методика исследования, позволяющие определять механические свойства высокоактивных материалов, облученных до высоких повреждающих доз. Исследовано влияние толщины образца d на результаты механических испытаний по схеме Shear Punch. Найдено минимальное значение $d=300\mu\text{м}$, превышение которого позволяет исключить влияние масштабного фактора и сопоставлять результаты испытаний образцов различной толщины.

В последние годы отмечается все увеличивающийся интерес к созданию новых методик изучения физико-механических свойств материалов, облученных до высоких повреждающих доз. Это обусловлено тем, что большинство штатных методик предполагает использование образцов сложной формы и, как правило, больших размеров. В случае работы с радиоактивными материалами это обстоятельство вызывает серьезные затруднения, поскольку, во-первых, исследователи обычно не располагают стандартными образцами и вынуждены применять в качестве объектов изучения фрагменты деталей и узлов произвольной формы и габаритов. Во-вторых, при работе с радиоактивными материалами возникают осложнения, связанные с ограничением времени проведения эксперимента, созданием громоздкой защиты от радиации и т.п.

Ситуация с отсутствием стандартных образцов особенно актуальна при исследовании изменения свойств конструкционных материалов промышленных ядерных реакторов на быстрых нейтронах, устройство которых не предполагает облучения материаловедческих сборок и образцов-свидетелей.

В этой связи в Pacific Northwest National Laboratory (США) был предложен метод испытаний облученных микрообъектов «на сдвиг», получивший название «Shear Punch» [1]. В отличие от других методик, он позволяет применять для механических испытаний микропробы, идентичные по форме и размерам образцам, используемым для просвечивающей электронной микроскопии и при этом определять значения как прочностных, так и пластических характеристик.

Основное практическое значение метода Shear-Punch заключается в возможности получения инженерной характеристики $\sigma_{0.2}$ (предела текучести «на растяжение») облученного материала по результатам определения τ (предела текучести «на сдвиг») для микрообразца. Характер корреляции между величинами τ и $\sigma_{0.2}$ для некоторых аустенитных хромоникелевых сплавов рассмотрен в ряде работ, (см. например, [1,2]). Показано, что между τ и $\sigma_{0.2}$ наблюдается, в общем случае, линейная зависимость с углом наклона, близким к 2 (см.рис.1).

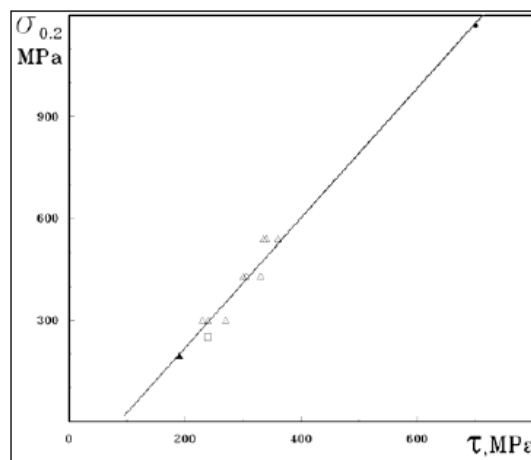


Рис.1. Корреляционная зависимость между напряжением текучести при одноосном растяжении $\sigma_{0.2}$ и сдвигом τ , полученная авторами настоящей работы. □ – исходная сталь 12X18H10T; ▲ – исходная сталь X18H9; ● – прокатанная сталь 12X18H10T; Δ – сталь 12X18H10T после аустенизации и наклепа.

В то же время, обсуждая особенности этого корреляционного соотношения исследователи, как правило, не затрагивают такой важный вопрос, как влияние толщины образца на характер получаемых результатов. Между тем, роль масштабного фактора может быть значительной [3] и особенно при изучении облученных материалов, когда приготовление одинаковых по толщине образцов является сложной задачей.

В данной работе, на примере аустенитной метастабильной стали 12X18H10T, исследовано влияние масштабного фактора (толщины образца) на значения механических характеристик, получаемых в экспериментах по методу Shear Punch.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 приведен внешний вид установки для проведения механических испытаний по схеме Shear Punch, собранной на базе универсальной испытательной машины FP-100/1.

**Shear Punch – новый прибор и метод определения
механических свойств высокоактивных материалов**

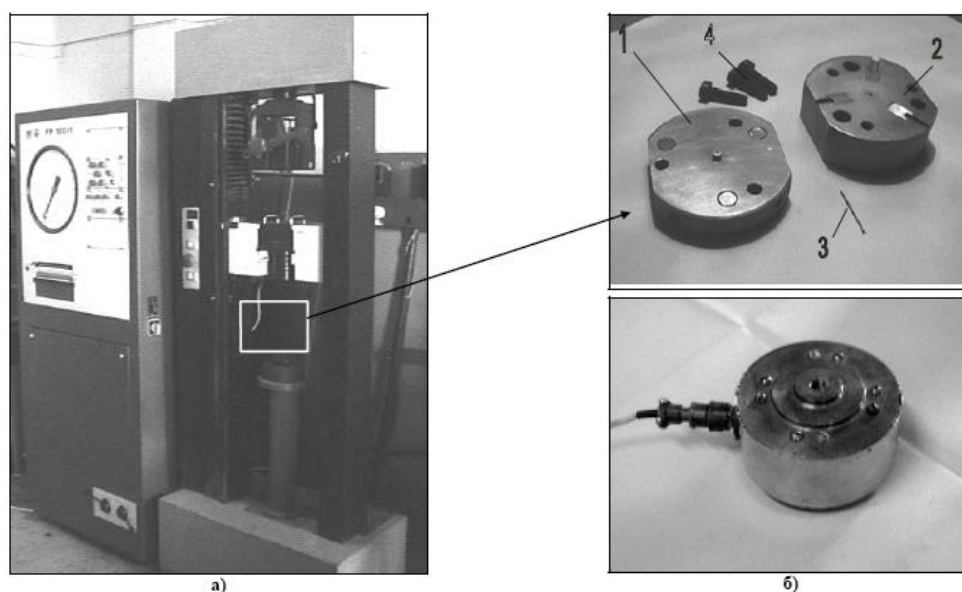


Рис. 2. Установка для проведения испытаний по схеме Shear-Punch. а) универсальная испытательная машина FP-100/1, б) сборка и высококачественный датчик нагрузки; 1, 2- верхняя и нижняя опорные плиты матрицы; 3- пуансон, 4-фиксаторы.

В связи с недостаточной чувствительностью штатной силоизмерительной системы машины FP-100/1, для регистрации крупномасштабной диаграммы «усилие сжатия – перемещение пуансона» разработан и изготовлен малоинерционный силоизмеритель оригинальной конструкции, совмещающий высокую чувствительность и необходимую жесткость (рис 2 б). Чувствительные силовые элементы силоизмерителя размещены между опорными плитами таким образом, что допускают деформацию только вдоль рабочей оси, обеспечивая при этом достаточно высокую жесткость. В качестве датчиков усилия использованы тонкопленочные тензорезисторы в количестве 32 штук, наклеенные по специальной технологии на кольцевые элементы и собранные по мостовой схеме.

В ходе испытаний по схеме Shear-Punch пластина облученного материала (3) (см.рис.3), вырезка которой из произвольной части конструкции не представляет сложности, фиксируется между плоскостями параллельными стальными плитками матрицы (2) и продавливается пуансоном (1) с определенной скоростью до образования откольной части (см. рис.4). Одновременно регистрируется кривая «усилие F – перемещение пуансона Δl ».

При Shear-Punch-испытании геометрия деформируемой зоны определяется диаметрами пуансона (1) и матрицы (2), величина которых может быть равной, например 1 и 1.04 мм соответственно [1]. Следует отметить, что, варьируя геометрию и диаметры подвижного пуансона и матрицы, можно получать деформируемую зону различного объема и формы.

Некоторые авторы используют подвижный пуансон с полусферическим наконечником [2], аргументируя это сравнительной легкостью моделирования процессов деформации.

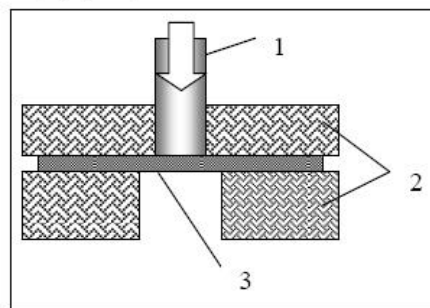


Рис. 3. Принципиальная схема прибора Shear Punch

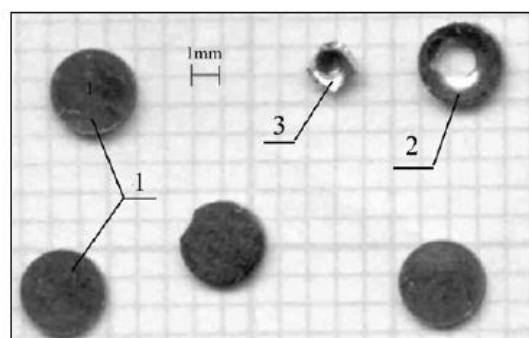


Рис.4. Образцы для электронной микроскопии до (1) и после (2, 3) механических испытаний по схеме Shear punch.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

В настоящей работе исследовали «на сдвиг» образцы стали 12Х18Н10Т в виде пластин размерами 6×10 мм и различной толщины. Было подготовлено 8 партий образцов с толщиной, заключенной в диапазоне 160 - 430 мкм. Образцы подвергались аустенизирующему отжигу при температуре 1373К, 30мин в вакууме и последующей электрополировке. Скорость перемещения пуансона была выбрана равной 0.4 мм/мин. Это с одной стороны позволило минимизировать время испытания, что важно при работе с радиоактивными материалами, а с другой – получить достаточно качественную запись кривой «усилие сжатия - перемещение пуансона»

В ходе эксперимента измеряемыми величинами были: сила F , прикладываемая к пуансону, и его перемещение Δl . Величина механического напряжения сдвига τ вычислялась, согласно [1],

$$\text{как: } \tau = \frac{F}{2\pi R_{\text{п}} d}, \text{ где } 2R_{\text{п}} - \text{ диаметр подвижного пуансона, равный 1 мм (см рис. 1).}$$

На рис. 5 показаны типичные экспериментальные кривые, регистрируемые при механических испытаниях по методу Shear Punch. Видно, что они во многом подобны кривым для случая одноосного растяжения: можно выделить участок упругой деформации, область деформационного упрочнения, предел прочности и область, аналогичную этапу локализации деформации.

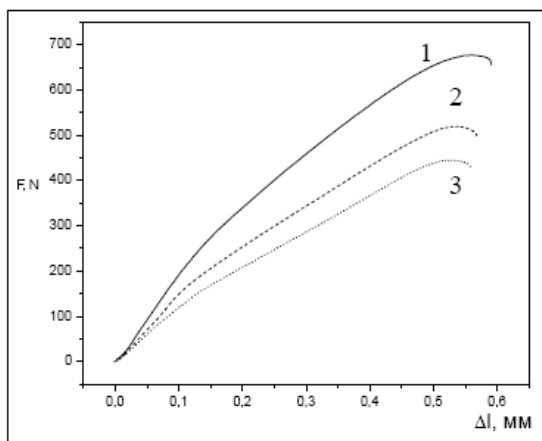


Рис 5. Кривые «Усилие F – перемещение пуансона Δl » для образцов различной толщины d 1–420 мкм, 2–340 мкм, 3–290 мкм.

Обращает на себя внимание также, что кривые пластического течения при Shear-Punch-эксперименте имеют такие же особые точки – предел текучести τ и предел прочности τ_B – как и при одноосном растяжении. За предел прочности принимали максимальное значение напряжения, фиксируемое в эксперименте, а за предел текучести значе-

ние напряжения, соответствующее окончанию линейного участка на Shear-Punch-диаграмме.

По результатам испытаний 8-и партий разнотолщинных образцов были построены зависимости величин пределов текучести τ и прочности τ_B «на сдвиг» от соответствующих толщин образцов (см. рис. 6 и 7). Из приведенных графиков видно, что как предел текучести τ , так и предел прочности τ_B возрастают с увеличением толщины образца. При этом в рассматриваемом диапазоне толщин, этот рост для величины τ составляет 105%, а для τ_B – только 15%.

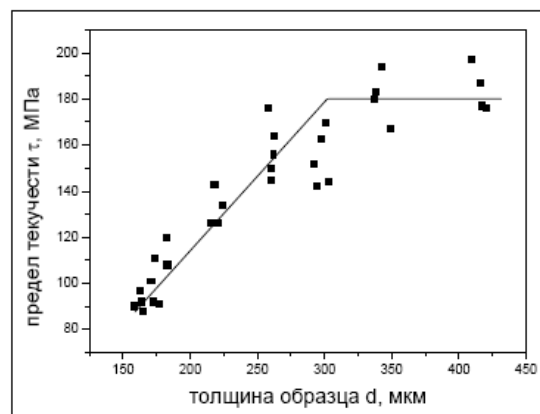


Рис. 6. Зависимость предела текучести от толщины образца.

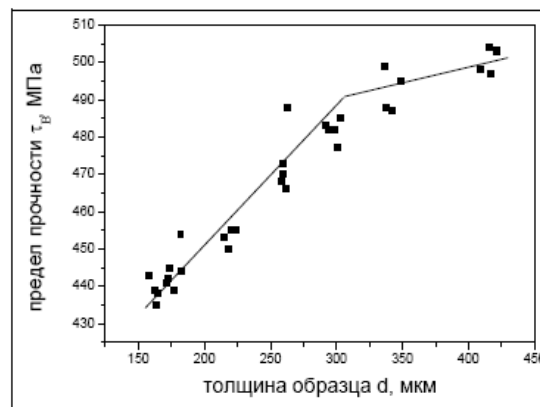


Рис. 7. Зависимость предела прочности «на сдвиг» от толщины образца

Из представленных данных следует также, что с ростом толщины образца наблюдается стремление величин τ_B и τ к некоторым предельным значениям. Например, τ практически не изменяется при толщине образца более 300 мкм.

Отметим, что согласно литературным данным при одноосном растяжении уменьшение размеров образца приводит в большинстве случаев к росту значений пределов текучести и прочности. В то же время для Shear Punch испытаний получена обратная картина. Это может быть объяснено, по всей

**СHEAR PUNCH – НОВЫЙ ПРИБОР И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

видимости, краевыми эффектами в участках образца, прилегающих к пуансону и матрице. В зоне контакта образца и угловой части пуансона создаются области дополнительных напряжений, влияние которых тем сильнее, чем тоньше образец. По мере развития пластической деформации и упрочнения материала влияние краевых эффектов снижается, что и объясняет более слабую зависимость предела прочности σ_B от толщины по сравнению с пределом текучести σ .

ЛИТЕРАТУРА

1. Garner F.A., Hankin G.L. and others An investigation into the origin and nature of the slope and x-axis intercept of the Shear Punch-Tensile Yield strength correlation using finite element analysis // Effects of radiation materials: 19th International Symposium, ASTM STP 1366, 2000, p 1018.
2. Song, S., Faulkner, R.G., and Flewitt P.E.J., "Grain boundary phosphorus segregation under irradiation and thermal aging and its effect on the ductile-to-brittle transition", Effects of radiation materials: 20th International Symposium, ASTM STP 1366, 2001, p 189.
3. Чечулин, Б.Б. Масштабный фактор и статистическая природа прочности. М., ОНТИ, 1963, 116 с.

ВЫВОДЫ

Внедрена новая методика – Shear-Punch – для определения характеристик прочности и пластичности высокорадиоактивных металлических материалов с использованием микрообразцов.

Показано, что при Shear-Punch-экспериментах влиянием масштабного фактора можно пренебречь в случае испытаний образцов толщиной более 300 мкм.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта МНТЦ К-172.