

УДК 539.3; 623.423

С.Б. Сапожников, А.В. Игнатова

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ПЛАСТИЛИНА ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

В работе проведены экспериментальные исследования механических свойств технического пластилина, который представляет собой композитный материал, состоящий из матрицы (смесь парафина и масел) и порошкового наполнителя (тальк, глина, пигменты) при растяжении, сжатии, сдвиге и внедрении сферического индентора. При постоянной скорости деформирования (растяжение, сжатие) получены кривые «напряжение – деформация», характеризующиеся малым упругим участком, зоной протяженной текучести до деформаций 15–20 %. На основании экспериментальных данных получена степенная зависимость предела текучести от скорости деформирования в диапазоне 0,0004...80 с⁻¹. Таким образом, деформирование технического пластилина может быть удовлетворительно описано упруго-вязкой моделью типа Нортон с последовательным соединением упругого и вязкого элементов.

Технический пластилин при растяжении и сдвиге свыше 3–5 % деформации начинает интенсивно накапливать рассеянные микрповреждения, что не позволяет использовать сдвиговые испытания в качестве тестовых при определении предела текучести подобно известным методам для металлов. Пределы текучести при сжатии и растяжении при одинаковых скоростях деформирования близки.

При внедрении сферического индентора диаметром 43 мм в пластилиновый блок толщиной 75 мм получена линейная диаграмма «усилие – глубина внедрения» вплоть до глубины 3 мм, что позволило считать постоянной величину твердости пластилина при определенной скорости деформирования. Удалось получить также динамическую твердость как энергию падающего тела, деленную на объем отпечатка в пластилине. Статическое и динамическое индентирование представляет собой перспективный метод исследования пластических свойств материалов в силу своей простоты. Однако необходимо установить корреляционный коэффициент, связывающий значение твердости с пределом текучести. Для рассмотренного материала такой коэффициент составил 0,24 при отсутствии трения между телами.

Ключевые слова: технический пластилин, пластичность, вязкость, растяжение, сжатие, сдвиг, скорость деформирования, диаграмма деформирования, предел текучести, твердость.

S.B. Sapozhnikov, A.V. Ignatova

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

MECHANICAL PROPERTIES OF TECHNICAL PLASTICINE UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADINGS

This paper presents experimental studies of the mechanical properties of technical plasticine – which is a composite material consisting of a matrix (a mixture of wax and oils) and particulate filler (talc, clay, pigments) – under tension, compression, shear and penetration of a spherical indenter. At a constant strain rate (tension, compression) “stress – strain” diagrams have been obtained and characterized by a small elastic zone and yield strains up to 15–20 %. On the basis of experimental data power law for dependence of yield strength vs the strain rate in the range of $0.0004 \dots 80 \text{ s}^{-1}$ have been obtained. Thus, the deformation of technical plasticine can be described by viscoelastic Norton-type model with a serial connection of elastic and viscous elements.

Under the tensile and shear strain of the technical plasticine over 3...5 % it begins to rapidly accumulate scattered microdamages, which does not allow using shear test as a test for determination of the yield stress like in the known methods related to metals. The yield stresses under tension and compression are close at the same strain rates.

A linear diagram “force – penetration depth” down to a depth of 3 mm are obtained at penetration of a spherical indenter with a diameter of 43 mm in a plasticine block of 75 mm thick. Thus, the plasticine hardness is constant at a certain strain rate. The authors have managed to get dynamic hardness as the energy of a falling body, divided by the volume of cavity in the plasticine. Static and dynamic penetration is a promising method for the study of plastic properties of materials because of its simplicity. However it is necessary to establish the correlation coefficient relating hardness and yield stress. For the considered material such ratio is 0.24 at the frictionless condition.

Keywords: technical plasticine, plasticity, viscosity, tension, compression, shear, strain rate, diagram of deformation, yield stress, hardness.

Введение

Технический пластилин (ТП) находит широкое применение, например, при тестировании средств индивидуального бронирования как среда, регистрирующая форму и глубину вмятины после удара пулей или ножом в бронежилет [1, 2], как модельный материал при изучении процессов обработки давлением (ковка, штамповка, прокатка [3–8]), при моделировании процессов пенетрации [9–16]. При нормальных условиях пластилин показывает себя низкомолекулярным вязкоупругим материалом. Его механические свойства существенно зависят от температуры и скорости деформирования. ТП представляет собой многокомпонентный композитный материал – высоковязкую суспензию воска, жиров и ультрамелкодисперсных наполнителей (талька, глины и пигментов). Трудность работы с ним заключается в его сравнительно низких механических свойствах, требующих высокоточного оборудования и тщательного контроля температуры испытаний. ТП не являет-

ся конструкционным материалом, и этим определяется отсутствие справочных данных о его механических свойствах. Отметим также, что математические модели пластилина используются в численных методах оценки качества бронезилетов [9–15], поэтому исследования механических свойств ТП являются актуальными.

В данной работе исследования проведены на скульптурном пластилине с долей наполнителя около 50 % в широком диапазоне скоростей деформирования (шесть порядков) при нормальных условиях (температура окружающей среды $+20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$). Показано, что ТП проявляет степенную зависимость предела текучести от скорости деформирования, т.е. представляет собой существенно реономную среду с возможностью накопления рассеянных микрповреждений и разрушением при больших деформациях.

1. Методика исследования и результаты

Проведены квазистатические испытания ТП на растяжение, сжатие и сдвиг. Замер деформаций проводили с использованием бесконтактного видеоэкстензометра AVE, входящего в комплект универсальной испытательной машины INSTRON 5882: на образец крепили метки, которые идентифицирует AVE, находит геометрический центр каждой метки и вычисляет текущее расстояние между ними. Метки должны следовать за деформациями образца, т.е. прочно крепиться к поверхности пластилина. В качестве меток использовали бумагу.

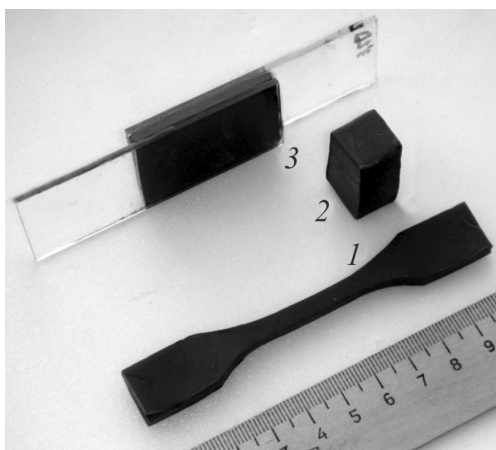


Рис. 1. Образцы для испытаний на растяжение – 1, сжатие – 2 и сдвиг – 3

Метки должны контрастировать с поверхностью образца, поэтому в AVE используется плоско поляризованный источник света, а материал меток должен обеспечивать деполяризацию света. Это легко выполняется на металлических поверхностях и не всегда на резине или пластике. При невозможности использования меток (большие деформации сжатия) использовали для замера деформаций датчик перемещения траверсы машины. Погрешность измерения удлинения образца соответствовала погрешности измерения перемещения траверсы машины (± 1 мкм), так как жесткость образцов была на несколько порядков ниже жесткости машины и силоизмерителя. Общий вид образцов для испытаний показан на рис. 1.

Испытания на растяжение

Из пластины ТП толщиной 5 мм на вырубном прессе IDM получены стандартные для низкомолекулярных материалов образцы (ASTM D412 тип 4), которые закрепляли в тисочных захватах Instron 2710-106 (рис. 2). Образцы имели общую длину 100 мм, длину и ширину рабочей части 20 и 5 мм соответственно и захватные части шириной 15 мм.

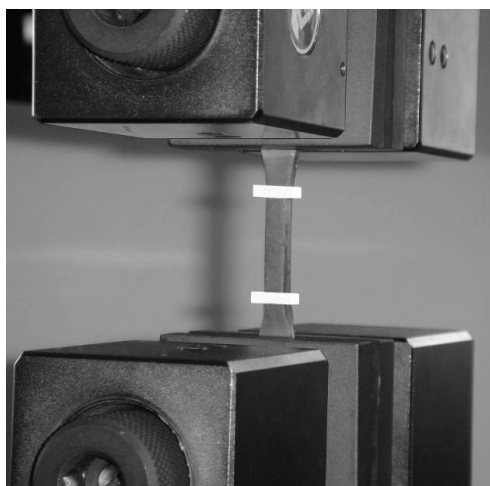


Рис. 2. Образец с метками для испытаний на растяжение в тисочных захватах

Силоизмеритель с пределом 100 Н был использован для фиксации нагрузки, скорость движения захвата варьировали в диапазоне 1–400 мм/мин. Полученные кривые «нагрузка – перемещение» обрабатывали в кривые «условное напряжение – деформация». Диаграммы

растяжения в условных напряжениях приведены на рис. 3. Цифры у кривых – скорость деформирования, с^{-1} , которая вычисляется как отношение скорости перемещения к начальной длине образца (на рис. 6, 8 и 9 аналогично). Эксперименты показывают наличие спадающих ветвей диаграмм растяжения при деформациях более 3–5 %, чего не было бы, если бы материал работал упругопластически и не имел внутренних микрповреждений (микротрещин и т.п.). Кривые в истинных напряжениях и деформациях не приводятся, так как нет оснований для использования предположения о несжимаемости при растяжении (см. рис. 3).

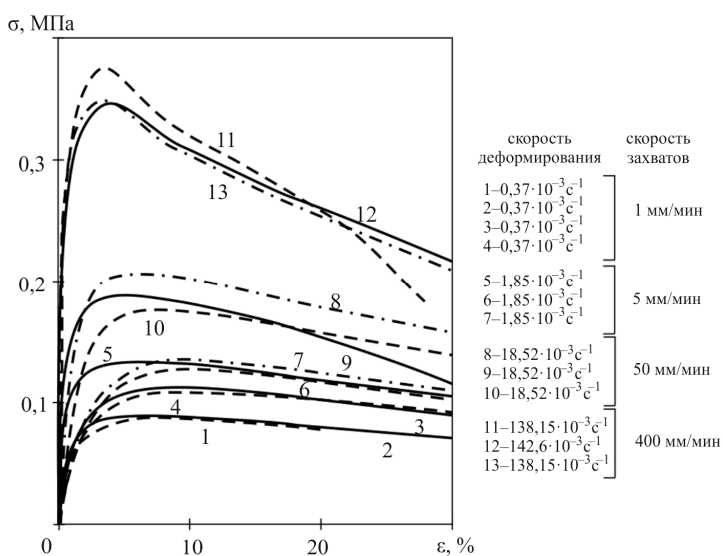


Рис. 3. Диаграммы растяжения

Можно отметить, что образование шейки и начало падающего участка кривой деформирования происходит при разных деформациях (от 4 % при высокой скорости до 10 % при малой скорости деформирования). Обработка начальных участков деформирования показала, что величина модуля упругости равна 30 ± 5 МПа.

Из пластины ТП толщиной 5 мм были вырезаны плоские образцы с размерами $27 \times 5 \times 100$ мм, которые закрепляли в тисочных захватах Instron 2710-106 (рис. 4). Скорость движения захвата 5 мм/мин, продольную и поперечную деформации фиксировали с помощью системы DIC (Digital image correlation, фирма Correlated Solution), скорость съемки составляла 1 кадр/с, схема 2D (съемка одной камерой). На по-

верхность образца были установлены специальные маркеры для фиксации продольной и поперечной деформации. Маркеры представляли собой канцелярские «гвоздики» с плоской шляпкой, у которых игольчатая часть была полностью погружена в образец. Иные способы крепления маркеров не позволили получить надежные результаты. Полученные зависимости «отношение поперечной деформации к продольной – продольная деформация» приведены на рис. 5, штрих-пунктир – полиномиальная аппроксимация, сглаживающая экспериментальные данные. При малых деформациях коэффициент Пуассона равен 0,30 и далее увеличивается до 0,45 при продольной деформации 3 %. Дальнейшее увеличение деформаций приводит к появлению микрповреждений (отслоение матрицы от твердых включений) и возникновению микрополостей, деформации которых приводят к немонотонному изменению отношения поперечной деформации к продольной. На рис. 5 приведена также расчетная зависимость отношения поперечной деформации к продольной для несжимаемого материала с начальным коэффициентом Пуассона 0,5. Различия достаточно очевидны, чтобы говорить о нарушении гипотезы несжимаемости при растяжении при деформациях, больших 3–5 %.

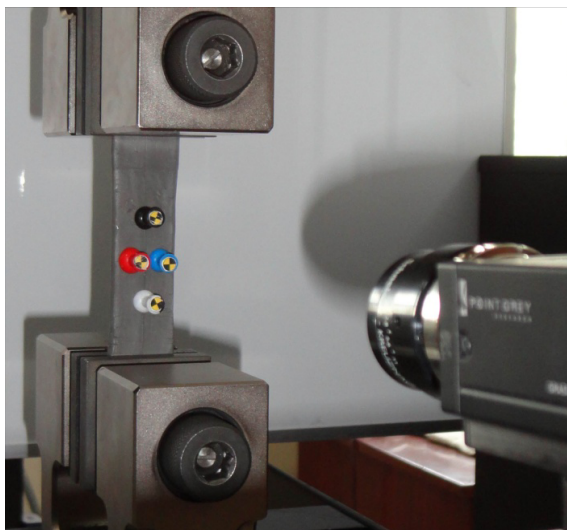


Рис. 4. Образец с метками для определения коэффициента Пуассона при растяжении

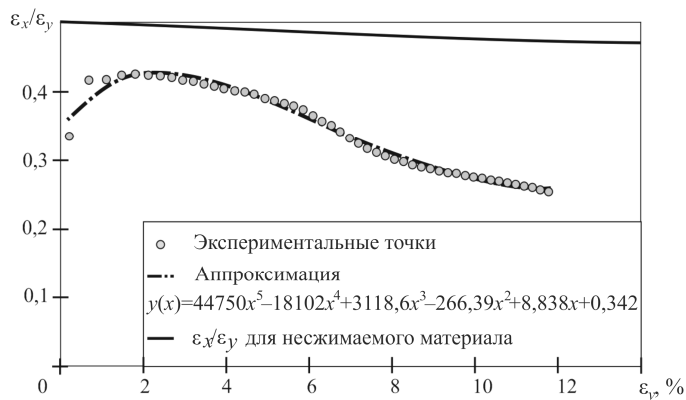


Рис. 5. Зависимость «поперечная деформация – продольная деформация» при растяжении

Испытания на сжатие

Из пластины ГП толщиной около 30 мм были вырезаны образцы в виде параллелепипеда со средними размерами 15×15×30 мм, которые испытывали на сжатие между плоскими плитами со скоростями 1, 5, 50 и 500 мм/мин. Диаграммы сжатия в условных напряжениях приведены на рис. 6.

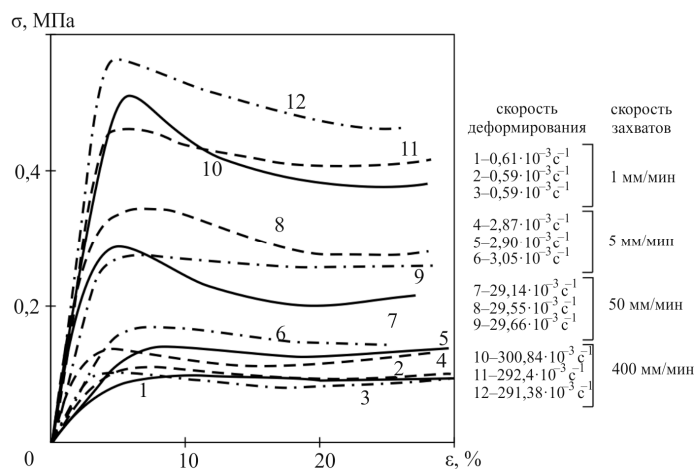


Рис. 6. Диаграммы сжатия ГП

Разброс механических свойств материала связан, очевидно, с неоднородностью структуры и зависимостью свойств от температуры (контроль температуры образца с погрешностью, меньшей 1 °С, был невозможен).

Испытания на сдвиг

Из пластины ТП толщиной 3,5 мм были вырезаны образцы в виде параллелепипеда с размерами 3,5×26×40 мм, которые закрепили между стеклянными пластинами толщиной 2 мм и испытали на чистый сдвиг (рис. 7) со скоростями сближения захватов 0,1–81 мм/мин. Высокая адгезия пластилина к стеклу после небольшого поджата позволяет проводить испытания вплоть до разрушения без дополнительного клея. Диаграммы сдвига приведены на рис. 8.

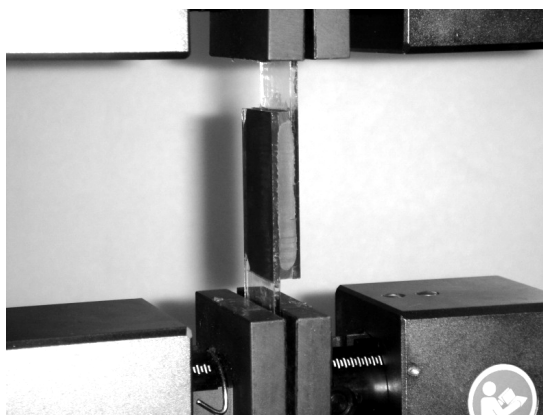


Рис. 7. Образец для испытаний на сдвиг в тисочных захватах

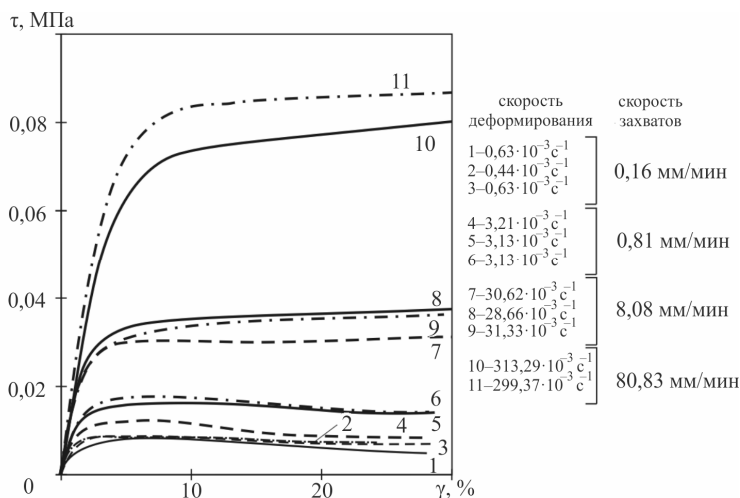


Рис. 8. Диаграммы сдвига ТП

Динамическое сжатие

Образцы с размерами 15×15 мм (площадь поперечного сечения $S = 225 \text{ мм}^2$) и длиной $L_0 = 30$ мм нагружали падающим грузом массой $m = 200$ г с высоты $H = 0,1\text{--}1$ м. Сопротивление воздуха не учитывали. Регистрировали остаточную длину ΔL образцов после испытаний для вычисления предела текучести σ_T и скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ в предположении идеальной текучести и пренебрежении тепловыми эффектами (потенциальная энергия груза полностью переходит в работу пластического деформирования):

$$\sigma_T = mgH / (S \cdot \Delta L), \quad \dot{\epsilon} = \sqrt{2gH} / (2L_0). \quad (1)$$

Значения пределов текучести в функции от скорости деформирования приведены на рис. 11.

Статическое индентирование

Альтернативой сжатию призматических образцов могут служить испытания на индентирование. В данной работе в поверхность ТП с размерами $180 \times 180 \times 75$ мм вдавливали стальную сферу диаметром $D = 43$ мм и массой $m = 321$ г. Она была закреплена на верхнем захвате и до испытания не касалась поверхности образца. Сферу внедряли со скоростями 5, 20 и 100 мм/мин на испытательной машине INSTRON 5882. Диаграммы индентирования «усилие P – глубина внедрения h » представлены на рис. 9. Можно заметить, что в начале диаграммы индентирования наблюдается нелинейность, но эта область достаточно мала, чтобы аппроксимировать линейной функцией диаграмму индентирования до глубины 2–3 мм без потери точности. Это позволяет считать твердость ТП по Бринеллю неизменной величиной в этом диапазоне.

После разгрузки на поверхности ТП регистрировали диаметр d отпечатка методом фотографирования с обработкой изображения на компьютере. Погрешность измерения диаметра не превышала 0,1 мм. Глубину отпечатка вычисляли по формуле

$$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2}. \quad (2)$$

В источниках [17–19] для весьма пластичных металлов приводится линейная связь твердости по Бринеллю с пределом прочности/текучести

$$\sigma_r = k \cdot HB, \quad HB = P / (2\pi Rh), \quad (3)$$

здесь P – сила; R – радиус сферы; $2\pi Rh$ – площадь поверхности отпечатка; k – коэффициент, равный 0,33–0,36 для сталей.

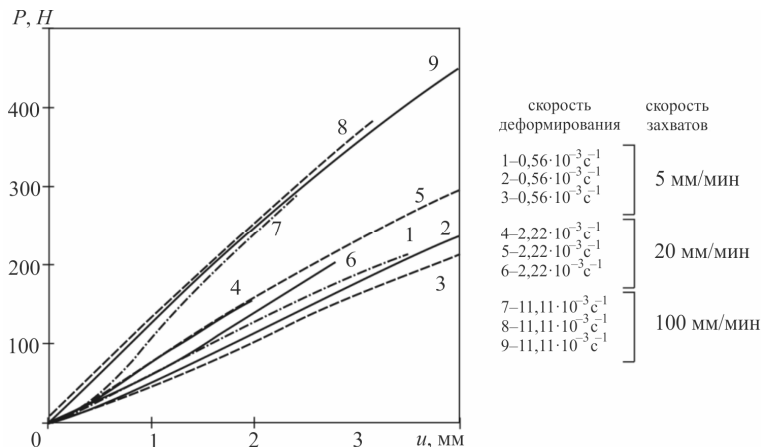


Рис. 9. Кривые индентирования при статическом нагружении

Для расчета скорости деформирования необходимо иметь информацию о размере очага деформации под индентором, где материал испытывает сжатие, по аналогии с длиной образца L_0 , на которую производится деление скорости движения траверсы u при испытаниях на сжатие призматических образцов. Очагом деформации в данной работе считается объем, испытывающий напряжения сжатия, составляющие не менее 5 % от максимального значения под индентором. Размеры очага деформации можно приближенно оценить, используя решение задачи Буссинеска (действие сосредоточенной силы на упругое полупространство) [20, 21]. В соответствии с этим решением радиальные напряжения сжатия изменяются по глубине образца по зависимости

$$\sigma(r) = \frac{3P}{2\pi} \frac{1}{r^2}, \quad (4)$$

где r – расстояние от точки приложения нагрузки. Учитывая, что напряжение на площадке контакта равно HB (см. зависимость (3)), то глубину очага деформации несложно найти из условия $\sigma(r=L_0) = HB/20$. Отсюда следует, что

$$L_0 = \sqrt{60R \cdot h}. \quad (5)$$

Для оценки корректности (5) проведен статический расчет напряженного состояния в зоне контакта пластилина со сферическим индентором в конечно-элементном пакете ANSYS Workbench v.14.5. В осесимметричной 2D модели материал пластилина и сферы задавали идеально упругими. Сфера была выполнена из стали, а упругие характеристики пластилина приняты следующими: $E = 25$ МПа, $\mu = 0,3$. Сферический индентор в расчете перемещали на 3 мм с автоматическим определением реакций опор (964 Н). Среднее напряжение сжатия на площадке контакта составляли 4,08 МПа (радиус площадки контакта и ее глубина составляли 8,5 и 1,75 мм соответственно). Значение, соответствующее 5 % от 4,08 МПа, равно 0,20 МПа. В результате расчета «длина образца L_0 » составила $L_0 = 47,5$ мм (рис. 10). Подстановка найденных значений в (5) дает $L_0 = \sqrt{60 \cdot 21,5 \cdot 1,75} = 47,5$ мм. Совпадение вполне удовлетворительное.

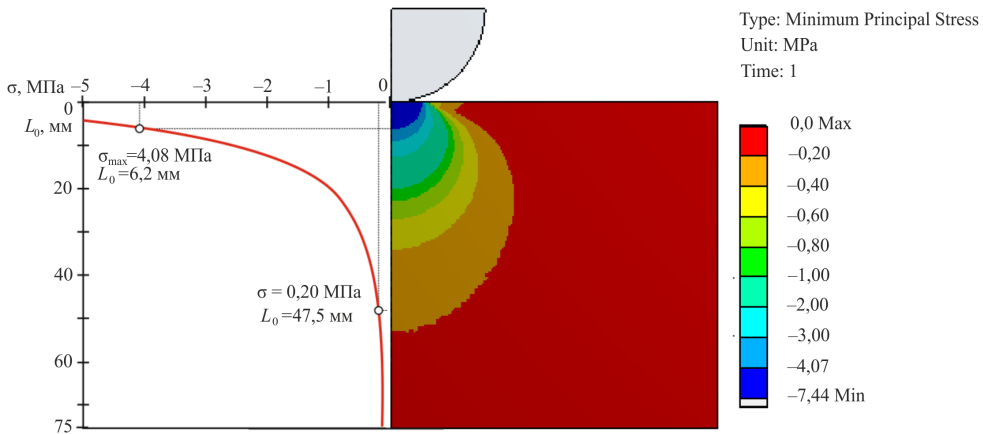


Рис. 10. Распределение сжимающих напряжений при индентировании

Если пластилин проявляет пластические свойства, то связь предела текучести и величиной твердости по Бринеллю (3) определяется коэффициентом $k = 0,24$ при отсутствии трения. Это было показано статическим расчетом в конечно-элементном пакете ANSYS Workbench v.14.5. В осесимметричной 2D-модели материал пластилина задавали упруго-идеально-пластическим (билинейная диаграмма деформирования с нулевым упрочнением), а материал сферы (диаметр 43 мм) –

сталь (идеально упругий). Отличие найденного коэффициента от величины 0,33–0,36 (3) объясняется практической недеформируемостью стального индентора в контакте с пластилином в отличие от испытания сталей. Диаграмма индентирования была практически линейной вплоть до максимального перемещения 3 мм.

Отмеченная линейность диаграмм индентирования оказывается полезной для анализа и сравнения статической и динамической твердости. В работах [22–25] введено понятие «динамической твердости» как частного от деления энергии падающего тела на объем вытесненного материала. В условиях квазистатического нагружения это соответствует энергии деформирования \mathcal{E} (площадь под кривой индентирования), деленной на объем отпечатка V в ТП. Результаты расчетов (таблица) показывают, что статическая и динамическая твердости близки, если скорости деформирования совпадают. Динамическую твердость вычисляли по зависимости

$$HB = \frac{\mathcal{E}}{V}, \quad \mathcal{E} = \frac{P \cdot u}{2}, \quad V = \pi h \left(\frac{d^2}{8} + \frac{h^2}{6} \right). \quad (6)$$

Сопоставление значений статической и динамической твердости

	Скорость деформирования 10^{-3} , 1/с	Статическая твердость, МПа	Динамическая твердость, МПа	Погрешность, %
1	0,89	0,45	0,48	6,25
2	0,89	0,44	0,47	6,38
3	0,89	0,39	0,43	9,30
среднее	0,89	0,43	0,46	7,31
4	3,50	0,58	0,60	3,33
5	3,50	0,53	0,56	5,36
6	3,50	0,55	0,59	6,78
среднее	3,50	0,55	0,58	5,16
7	17,53	0,89	0,92	3,26
8	17,53	0,90	0,95	5,26
9	17,53	0,83	0,89	6,74
среднее	17,53	0,87	0,92	5,07

Динамическая твердость (ударное индентирование)

На поверхность ТП с размерами 180×180×75 мм с высоты $H = 0,1$ –1 м вертикально сбрасывали сферический индентор диаметром $D = 43$ мм и массой $m = 321$ г. Соппротивлением воздуха пренебрегали.

Измеряли диаметр отпечатка методом фотографирования, аналогично п. «Статическое индентирование» и вычисляли его глубину по формуле (2).

Динамическую твердость вычисляли по зависимости (6), в которой вместо $0,5Pu$ использовали потенциальную энергию падающего тела mgH . Вычисление динамических пределов текучести проводили по зависимости (3). На рис. 11 представлена степенная зависимость предела текучести от скорости деформирования и экспериментальные точки при квазистатическом и динамическом нагружениях, которая в двойных логарифмических координатах имеет вид линейной функции.

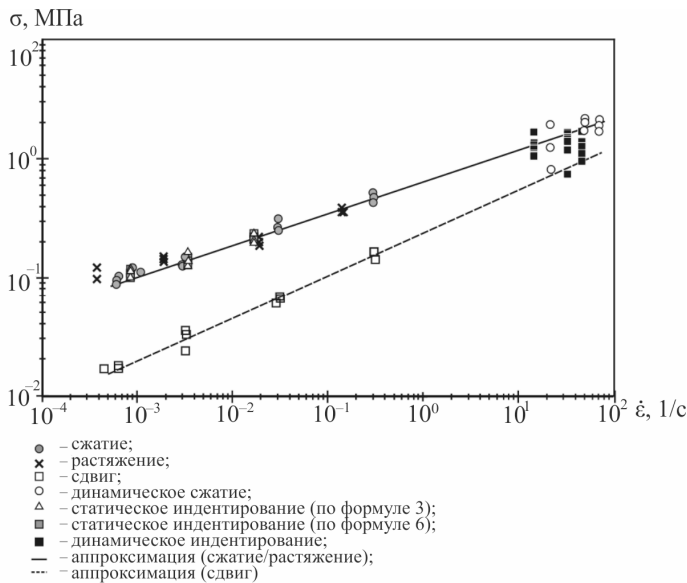


Рис. 11. Зависимости пределов текучести от скорости деформирования

Аппроксимирующая кривая для случая растяжения/сжатия/индентирования имеет вид степенного закона:

$$\sigma_T = 6,37 \cdot 10^5 \cdot \dot{\epsilon}^{0,266} . \quad (7)$$

Для чистого сдвига это уравнение несколько иное:

$$\sigma_T = 2,23 \cdot 10^5 \cdot \dot{\epsilon}^{0,347} . \quad (8)$$

Однако при высоких скоростях деформирования результаты сближаются, что делает возможным использование классических теорий пластичности при анализе баллистических задач со скоростями

деформирования более 10^4 с^{-1} . Иными словами, технический пластилин в расчетах на растяжение/сжатие может быть имитирован моделью типа Нортон (вязкоупругое тело с последовательно соединенным упругим и вязким элементами). У вязкого элемента скорость ползучести зависит от приложенного напряжения в соответствии со степенным законом типа $\dot{\epsilon} = 1,54 \cdot 10^{-22} \sigma^{3,759}$.

2. Результаты испытаний и их анализ

Получено, что технический пластилин при растяжении и сжатии имеет близкие значения физических пределов текучести в диапазоне скоростей деформирования $0,0004\text{--}80 \text{ с}^{-1}$. Однако испытания на сдвиг нарушают наблюдаемую картину: предел текучести при сдвиге оказывается связан с пределами текучести на растяжение (сжатие) коэффициентом 0,24, тогда как для классического упругопластического материала должно быть 0,5–0,6 (в зависимости от выбранной теории пластичности). Это связано с тем, что при сдвиге не выполняется гипотеза несжимаемости материалов (неизменность объема) при некоторых деформациях из-за развития рассеянных микрповреждений от растягивающей компоненты напряженного состояния (рис. 3 при деформациях больше 3–5 %), т.е. задолго до полного разрушения.

Предел текучести материала при испытаниях на ударное индентирование удовлетворительно согласуется с результатами измерений предела текучести при испытаниях на динамическое сжатие призматических образцов.

Выводы

Технический пластилин является полимерным композитом, армированным мелкодисперсными наполнителями с объемной долей около 50 %. Он демонстрирует реономное поведение, изменяя предел текучести в 20 раз при изменении скорости деформирования на пять порядков. Материал проявляет при сдвиге и сжатии развитую пластичность, деформации текучести превышают 25–30 %. Однако при растяжении пластилин ведет себя как материал с весьма ограниченной пластичностью, в диапазоне деформаций 3–5 % в нем зарождаются микрповреждения, приводящие к появлению спадающего участка кривой «напряжение – деформация», образованию шейки и разрыву при средних деформациях 25–40 %. При динамическом

сжатии падающим грузом предел текучести пластилина достигает величины 2 МПа.

Полученные данные могут быть использованы при численных расчетах кинетики деформирования тканевых бронеструктур, лежащих на вязкоупругом основании, а также при экспериментальном моделировании процессов пластической обработки металлов.

Библиографический список

1. NIJ Standard–0101.04. Ballistic Resistance of Personal Body Armor / National Institute of Justice Office of Science and Technology, September 2000. – 67 p.

2. NIJ Standard–0115.00. Stab Resistance of Personal Body Armor / National Institute of Justice Office of Science and Technology, September 2000. – 46 p.

3. Park J.-J. Finite-element analysis of cylindrical-void closure by flat-die forging // *ISIJ International*. – 2013. – Vol. 53. – No. 8. – P. 1420–1426.

4. Segawa A., Kawanami T. Rolling-deformation characteristics of clad materials determined by model experiment and numerical simulation: experimental rolling tests using plasticine // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1995. – Vol. 47. – P. 375–384.

5. Zulauf J., Zulauf G. Rheology of plasticine used as rock analogue: the impact of temperature, composition and strain // *Journal of Structural Geology*. – 2004. – Vol. 26. – P. 725–737.

6. Exploring material flow in friction stir welding: Tool eccentricity and formation of banded structures / F. Gratecap, M. Girard, S. Marya, G. Racineux // *International Journal of Material Forming*. – 2012. – Vol. 5. – P. 99–107. DOI: 10.1007/s12289-010-1008-5

7. An inverse technique for evaluation of flow parameters of modeling materials using extrusion / K.K. Pathak, A.K. Soni, M. Sharma, M.M. Sahu // *Experimental Techniques*. – 2013. – Vol. 37. – No. 2. – P. 16–22. DOI: 10.1111/j.1747-1567.2011.00745.x

8. Sofuoglu H., Rasty J. Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes // *Tribology International*. – 2000. – Vol. 33. – P. 523–529.

9. Bhattacharjee D., Kumar A., Biswas I. Energy absorption and dynamic deformation of backing material for ballistic evaluation of body armour // *Defence Science Journal*. – 2013. – Vol. 63. – No. 5. – P. 462–466.

10. Johnson W., Sengupta A.K., Ghosh S.K. Plasticine modelled high velocity oblique impact and ricochet of long rods // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 1982. – Vol. 24. – No. 7. – P. 437–455.

11. Долганина Н.Ю. Оценка баллистического предела и прогиба многослойных тканевых пластин при ударе индентором // *Вестник ЮУрГУ. Машиностроение*. – 2010. – Вып. 15, № 10 (186). – С. 17–23.

12. Bivin Yu. K. Strain and Fracture of Circular Plates under Static and Dynamical Loading by a Spherical Body // *Mechanics of Solids*. – 2008. – Vol. 43. – No. 5. – P. 798–807. DOI: 10.3103/S0025654408050154

13. Bivin Yu.K., Simonov I.V. Mechanics of Dynamic Penetration into Soil Medium // *Mechanics of solids*. – 2010. – Vol. 45. – No. 6. – P. 892–920. DOI: 10.3103/S0025654410060130

14. Karahan M., Kus A., Eren R. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics // *International Journal of Impact Engineering*. – 2008. – Vol. 35. – No. 6. – P. 499–510.

15. Cork C.R., Foster P.W. The ballistic performance of narrow fabrics // *International Journal of Impact Engineering*. – 2007. – Vol. 34. – No. 3. – P. 495–508. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.10.006

16. Исследование закономерностей локализации пластической деформации при высокоскоростном пробивании образцов из сплава А6061 / Е.А. Ляпунова, М.А. Сокоиков, В.В. Чудинов, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк // *Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика*. – 2010. – № 2. – С. 79–86.

17. Zhang P., Li S.X., Zhang Z.F. General relationship between strength and hardness // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 529. – P. 62–73.

18. Стоев П.И., Мощенок В.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости // *Вестник Харьковского научного университета им. Каразина*. – 2003. – Т. 601, № 2(22). – С. 106–112.

19. Марковец, М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

20. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.

21. Филоненко-Бородач М.М. Теория упругости. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 364 с.

22. Способ определения динамической твердости материалов: пат. 2258211 Рос. Федерация: МКП⁷ G 01 N 3/48 / Болденков В.В., Дрокин П.А.; заявитель и патентообладатель Минатом РФ, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – № 2004109856/28; заявл. 31.03.04; опубл. 10.08.05, Бюл. № 22. – 6 с.

23. Горик А.В., Ковальчук С.Б., Шулянский Г.А. Определение упругопластического коэффициента ударного взаимодействия сферического индентора с деформируемым полупространством // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1, № 7 (61). – С. 56–59.

24. Inelastic deformation and failure of tungsten carbide under ballistic-loading conditions / P.J. Hazella, G.J. Appleby-Thomas, K. Herlaar, J. Painter // *Materials Science and Engineering: A*. – 2010. – Vol. 527. – No. 29–30. – P. 7638–7645.

25. Sundararajan G., Tirupataiah Y. The localization of plastic flow under dynamic indentation conditions: I. Experimental results // *Acta Materialia*. – 2006. – Vol. 54. – P. 565–575. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.09.022

References

1. NIJ Standard–0101.04. Ballistic Resistance of Personal Body Armor. USA, National Institute of Justice Office of Science and Technology, 2000, 67 p.

2. NIJ Standard–0115.00. Stab Resistance of Personal Body Armor. USA, National Institute of Justice Office of Science and Technology, 2000, 46 p.

3. Park J.-J. Finite-element analysis of cylindrical-void closure by flat-die forging. *ISIJ International*, 2013, vol. 53, no. 8, pp. 1420-1426.

4. Segawa A., Kawanami T. Rolling-deformation characteristics of clad materials determined by model experiment and numerical simulation: experimental rolling tests using plasticine. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, vol. 47, pp. 375-384.

5. Zulauf J., Zulauf G. Rheology of plasticine used as rock analogue: the impact of temperature, composition and strain. *Journal of Structural Geology*, 2004, vol. 26, pp. 725-737.

6. Gratecap F., Girard M., Marya S., Racineux G. Exploring material flow in friction stir welding: Tool eccentricity and formation of banded structures. *International Journal of Material Forming*, 2012, vol. 5, pp. 99-107.

7. Pathak K.K., Soni A.K., Sharma M., Sahu M.M. An inverse technique for evaluation of flow parameters of modeling materials using extrusion. *Experimental Techniques*, 2013, vol. 37, no. 2, pp. 16-22.

8. Sofuoglu H., Rasty J. Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes. *Tribology International*, 2000, vol. 33, pp. 523-529.

9. Bhattacharjee D., Kumar A., Biswas I. Energy absorption and dynamic deformation of backing material for ballistic evaluation of body armour. *Defence Science Journal*, 2013, vol. 63, no. 5, pp. 462-466.

10. Johnson W., Sengupta A.K., Ghosh S.K. Plasticine modelled high velocity oblique impact and ricochet of long rods. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1982, vol. 24, no. 7, pp. 437-455.

11. Dolganina N.Yu. Otsenka ballisticheskogo predela i progiba mnogosloynnykh tkanevykh plastin pri udare indentorom [Evaluation of ballistic limit and multilayer fabric plate deflection under indenter impact]. *Bulletin of the SUSU. Mechanical engineering industry*, 2010, vol. 15, no. 10 (186), pp. 17-23.

12. Bivin Yu.K. Strain and Fracture of Circular Plates under Static and Dynamical Loading by a Spherical Body. *Mechanics of Solids*, 2008, vol. 43, no. 5, pp. 798-807.

13. Bivin Yu.K. Mechanics of Dynamic Penetration into Soil Medium. *Mechanics of solids*, 2010, vol. 45, no. 6, pp. 892-920.

14. Karahan M., Kus A., Eren R. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, vol. 35, no. 6, pp. 499-510.

15. Cork C.R., Foster P.W. The ballistic performance of narrow fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34, no. 3, pp. 495-508.

16. Lyapunova E.A., Sokovikov M.A., Chudinov V.V., Uvarov S.V., Naimark O.B. Issledovanie zakonomernostei lokalizatsii plasticheskoi deformatsii pri vysokoskorostnom probivanii obraztsov iz splava A6061 [Investigation of regularities of plastic deformation localization at dynamic loading of A6061 alloy – samples]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2010, no. 2, pp. 79-86.

17. Zhang P., Li S.X., Zhang Z.F. General relationship between strength and hardness. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 529, pp. 62-73.

18. Stoev P.I., Moschenok V.I. Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov i splavov po tverdosti [Definition of mechanical properties of metals and alloys on hardness]. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University*, 2003, vol. 601, no. 2(22), pp. 106-112.

19. Markovets M.P. Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metallov po tverdosti [Determination of the Mechanical Properties of Metals on the Basis of Hardness]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 191 p.

20. Lurie A.I. Teoriia uprugosti [Theory of Elasticity]. Moscow: Nauka, 1970, 940 p.

21. Filonenko-Borodach M.M. Teoriia uprugosti [Theory of Elasticity]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1959, 364 p.

22. Boldenkov V.V., Drokin P.A. Method of determining dynamical hardness of materials. RU patent 2258211, Int. Cl.7 G 01 N 3/48. Proprietor(s) Minatom RF (RU), FGUP "RFJaTs-VNIIEF" (RU). Appl. No. 2004109856/28. Filed 31.03.2004 and issued 10.08.2004 Bull. 22.

23. Goryk A., Kovalchuk S., Shulyansky D.G. Opredelenie uprugoplasticheskogo koeffitsienta udarnogo vzaimodeistviia sfericheskogo indentora s deformiruemym poluprostranstvom [Determination of elastoplastic coefficient of shock interaction of spherical indenter with deformable halfspace]. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2013, vol. 1, no. 7 (61), pp. 56-59.

24. Hazella P.J., Appleby-Thomas G.J., Herlaar K., Painter J. Inelastic deformation and failure of tungsten carbide under ballistic-loading conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527, no. 29-30, pp. 7638-7645.

25. Sundararajan G., Tirupataiah Y. The localization of plastic flow under dynamic indentation conditions: I. Experimental results. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, pp. 565-575.

Об авторах

Сапожников Сергей Борисович (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, e-mail: ssb@susu.ac.ru).

Игнатова Анастасия Валерьевна (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, e-mail: ign.nastya@gmail.com).

About the authors

Sergey B. Sapozhnikov (Chelyabinsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines, South Ural State University (76, Lenin av., Chelyabinsk, Russian Federation, 454080, e-mail: ssb@susu.ac.ru).

Anastasia V. Ignatova (Chelyabinsk, Russian Federation) – Ph.D. student, Department of Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines, South Ural State University (76, Lenin av., Chelyabinsk, Russian Federation, 454080, e-mail: ign.nastya@gmail.com).

Получено 24.04.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Сапожников С.Б., Игнатова А.В. Исследование механических свойств технического пластилина при квазистатическом и динамическом деформировании // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 200–219.

Please cite this article in English as:

Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. Mechanical properties of technical plasticine under static and dynamic loadings. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 2. P. 200-219.