

Досліджено фізико-механічні та трибологічні властивості матеріалів, отриманих на основі термопласту фенілон С-2, модифікованого терморозширеним графітом та синтезованим епоксисилікатом кобальту. Встановлено оптимальний склад композиту й режими експлуатації. Показано, що одночасне використання наповнювачів приведе, до їх взаємної активації та синергетичного ефекту, який дозволяє широко варіювати експлуатаційні властивості матеріалу.

**Ключові слова:** наповнювач, тертя, зношування, міцність.

*Physico-mechanical and tribotechnical properties of materials obtained on the basis of phenilon C-2 thermoplastic modified with thermally expanded graphite and synthesized by cobalt epoxy-silicate have been investigated. The optimum composite content and maintenance modes have been stated. The combined application of compounds result in their mutual activation and synergetic effect allowing to vary widely the operational properties of the material was shown.*

**Key words:** compound, friction, wear, durability.

УДК 621.771.23.09.

Канд. техн. наук А. Б. Максимов

Государственный морской технологический университет, г. Керчь

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ-СЖАТИИ

Представлены данные об изменении пластических характеристик стали при деформировании образцов в одном направлении и циклическом по жесткой схеме нагружения.

**Ключевые слова:** деформация, растяжение, сжатие, цикличность, объём, пластичность, коэффициент поперечной деформации.

### Материал и методика исследования

Для исследования использовали плоские образцы рабочей частью  $3 \times 3 \times 3$  мм с захватами из толстолистовой стали марок 10ХСНД и 17Г1С-у в отожженном, нормализованном и термоупрочненном состояниях. Испытание на одноосное растяжение, сжатие и циклическое растяжение-сжатие проводили на усовершенствованной установке ИМАШ-5с-65 [1] при комнатной температуре. Циклическое деформирование проводили по жесткой схеме нагружения по симметричному циклу с амплитудой деформации 2 и 5 %. Для исследования течения металла на рабочей части образца наносили отпечатки с помощью микротвердомера ПМТ-3м через равные промежутки в продольном и поперечном направлениях. Продольную и поперечную деформацию определяли по изменению расстояний между отпечатками в соответствующих направлениях. Коэффициент поперечной деформации рассчитывали по формуле:  $\nu = \varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}$  и брали по абсолютной величине, где  $\varepsilon_{\perp}$  и  $\varepsilon_{\parallel}$  – соответственно поперечная и продольная деформации.

### Теория и анализ полученных результатов

При одноосном растяжении в интервале 2-3 % величина поперечной деформации возрастает более интенсивно, причем коэффициент поперечной деформации составляет 0,62 и 0,70 соответственно для сталей

17Г1С-у и 10ХСНД (рис. 1). С увеличением продольной деформации интенсивность возрастания поперечной деформации уменьшается, при этом коэффициент поперечной деформации составляет 0,36–0,38 (что довольно близко к значению коэффициента Пуассона в упругой области – 0,28–0,30). Характерно, что зависимость между продольной и поперечной деформациями на обоих участках носит прямопропорциональный характер.

На рис. 2 представлены зависимости относительного изменения объема при растяжении и сжатии. На первых этапах деформирования при растяжении для нормализованного и термоупрочненного состояний происходит уменьшение объема, а затем для сталей во всех структурных состояниях происходит увеличение объема. При сжатии изменение относительно объема противоположно. Такой характер изменения относительного объема находится в соответствии с результатами работы [2]. В теории упругости относительное изменение объема определяется по формуле [3]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1$  – продольная деформация,  
 $\varepsilon_2, \varepsilon_3$  – поперечные деформации в двух взаимноперпендикулярных направлениях.

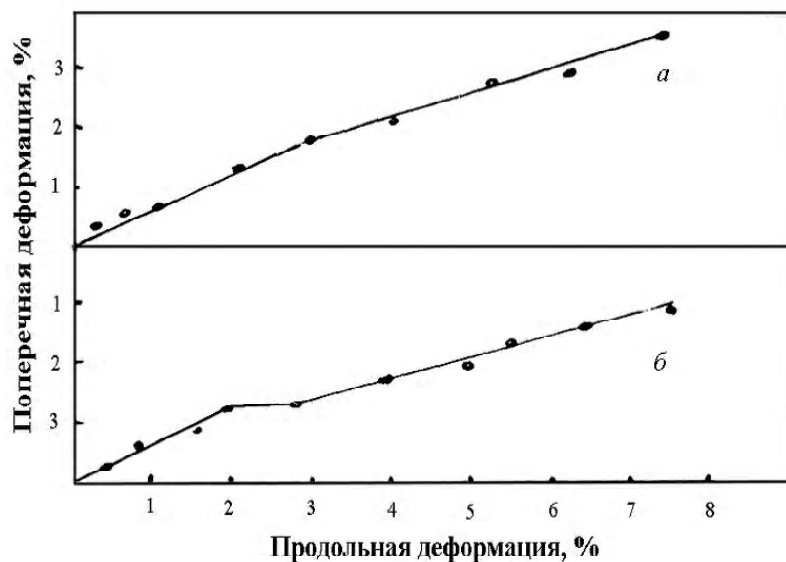


Рис. 1. Зависимость между продольной и поперечной деформациями при одноосном растяжении:

*a* – сталь 17Г1С – у; *б* – сталь 10ХСНД

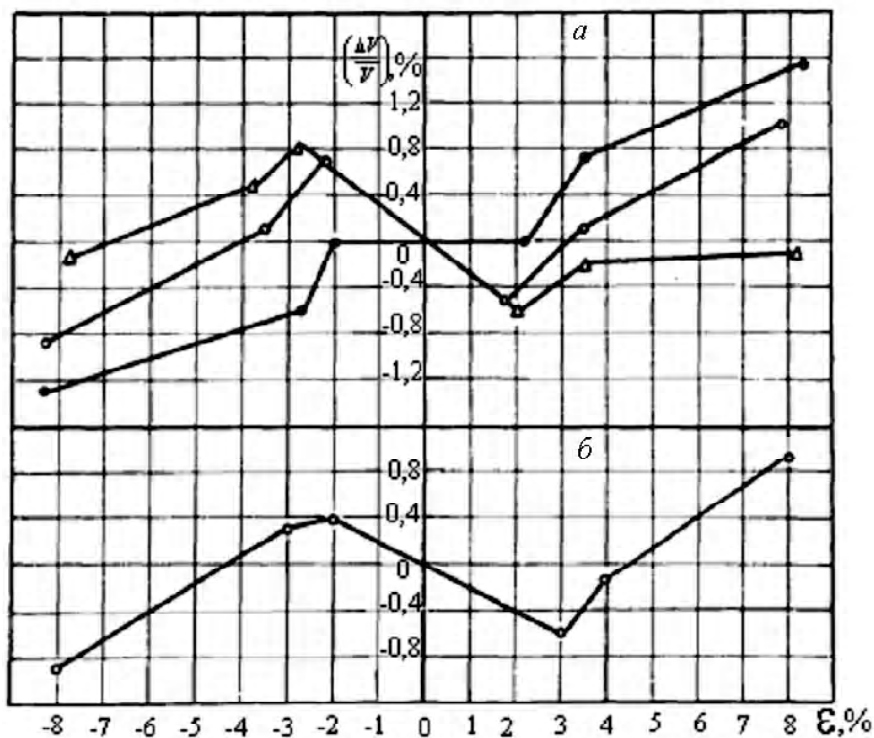


Рис. 2. Зависимость относительного изменения объема  $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$  от деформации при растяжении и сжатии:

*a* – сталь 17Г1С – у; *б* – сталь 10 ХСНД;

● – отожженное состояние; ○ – нормализованное состояние; Δ – термупрочненное состояние

Так как рабочее сечение образца квадратное, то поперечные деформации в двух взаимноперпендикулярных направлениях одинаковые, т.е.  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ , тогда формула (1) примет вид:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) справедливы и для области пластической деформации, так как отмечается кусочно-прямая зависимость между поперечной и продольной деформациями (рис. 1). Учитывая зависимость между продольной и поперечной деформациями, выражение (2) преобразуем:

при растяжении:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1(1 - 2\nu), \quad (3)$$

при сжатии:

$$\frac{\Delta V}{V} = -\varepsilon_1(1 - 2\nu). \quad (4)$$

Согласно экспериментальным данным, при растяжении до (2–3) % продольной деформации коэффициент поперечной деформации составляет 0,62–0,70 и относительное изменение объема уменьшается. При большей степени деформации коэффициент поперечной деформации составляет 0,36–0,38 и относительное изменение объема возрастает. Из формулы (3) следует, что если коэффициент поперечной деформации больше 0,5, то происходит уменьшение относительного изменения объема, а если менее – увеличение.

При деформации продольного сжатия до (2–3) %, когда  $\nu = (0,62-0,70)$  относительное изменение объема возрастает, а при большей деформации, когда  $\nu = (0,36-0,38)$  относительное изменение объема уменьшается.

Полученные экспериментальные данные находятся в полном соответствии с формулами (3) и (4).

На рис. 3 представлены зависимости поперечной деформации от продольной при растяжении с последующим сжатием по жесткой схеме нагружения, т. е. длина образца при сжатии приводится в исходное состояние. Деформирование по такой схеме приводит к появлению отрицательной остаточной деформации в поперечном направлении. Т. е. возникает гистерезис поперечной деформации. Это приводит к уменьшению относительного объема металла.

При деформировании по полному симметричному циклу по жесткой схеме нагружения с амплитудой 5 % относительное уменьшение объема составляет (0,2–0,6) % в зависимости от марки стали. При амплитуде деформации 2 % – относительного изменения объема в течение одного полного симметричного цикла практически не наблюдалось.

На рис. 5 представлено изменение поперечной деформации при циклическом растяжении – сжатии в зависимости от числа циклов. При амплитуде продольной деформации 5 % происходит увеличение степени поперечной деформации по затухающей зависимости.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о наличии в реальной структуре металла ориентированных микронесплошностей, которые могут сформироваться, например, в процессе горячей прокатки.

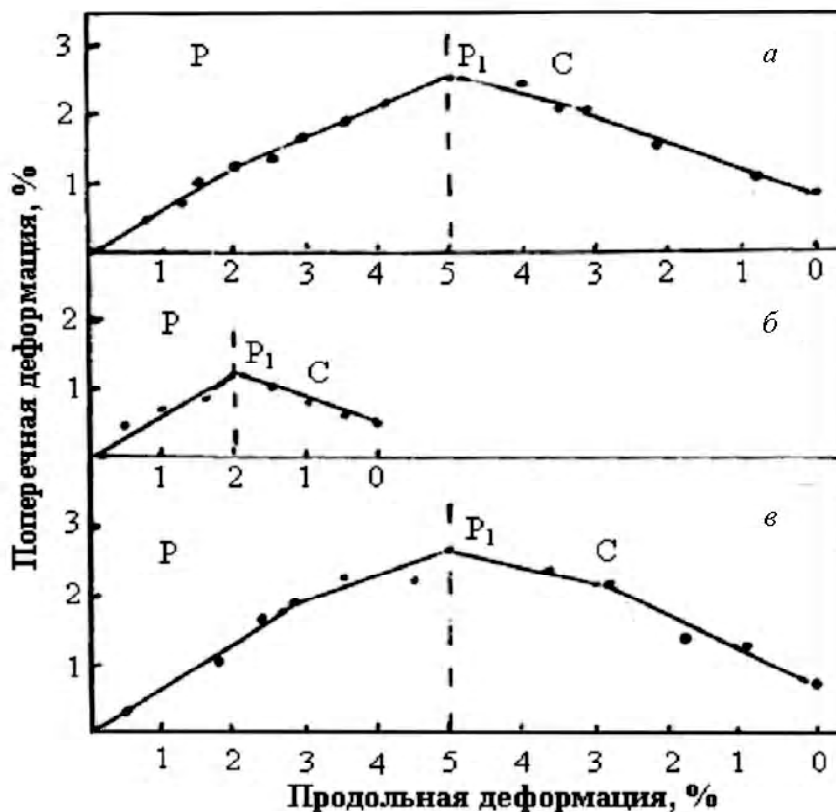


Рис. 3. Изменение поперечной деформации при циклическом деформировании:

а – сталь 17Г1С – у; б – сталь 10 ХСНД

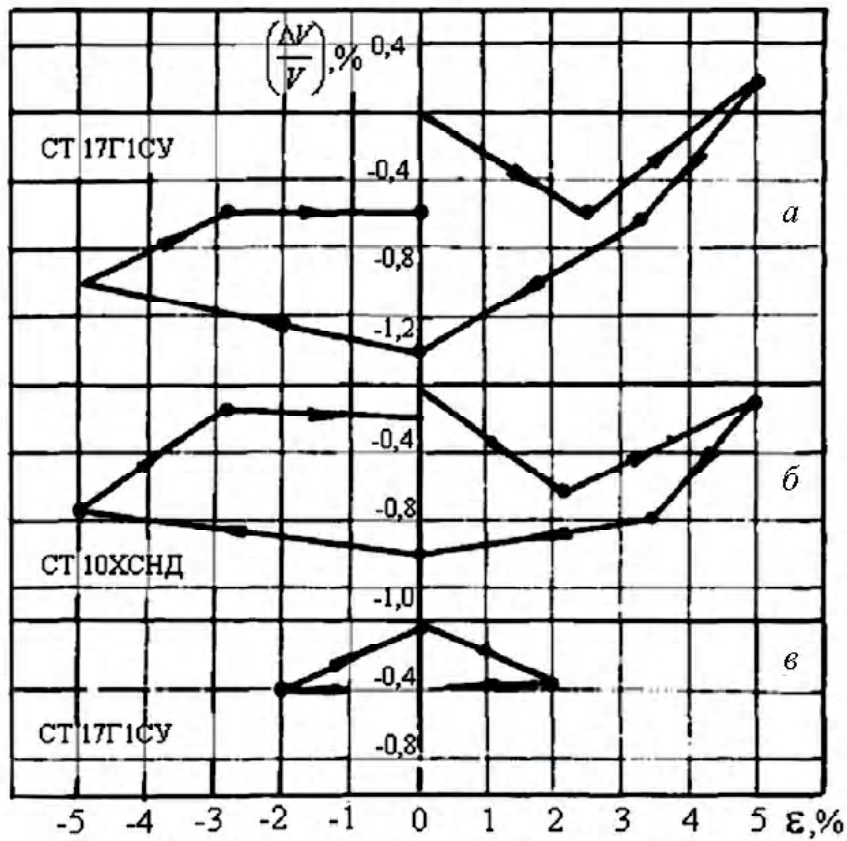


Рис. 4. Изменение относительного изменения объема за полный симметричный цикл деформирования:  
*a, б* – амплитуда деформирования 5 %; *в* – амплитуда деформирования 2 %

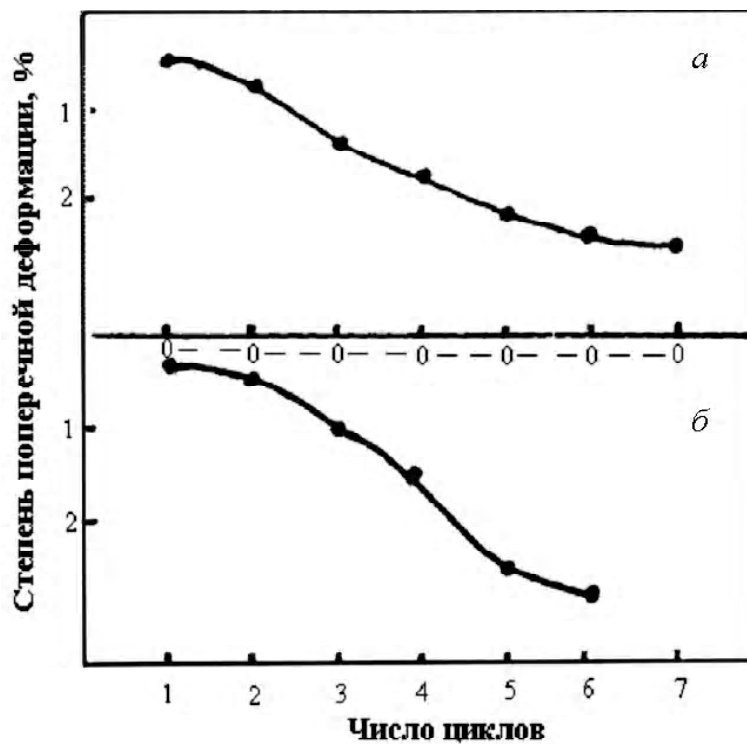


Рис. 5. Изменение продольной деформации в зависимости от числа циклов при циклическом деформировании с амплитудой 5 %: *a* – сталь 17Г1С – у; *б* – сталь 10 ХСНД

В данной работе направление продольной деформации совпадало с направлением горячей прокатки. Вследствие этого на начальных этапах растяжения или сжатия (до 2–3 %) происходит интенсивное соответственно закрытие или открытие ориентированных несплошностей металла. Поэтому в этом случае коэффициент поперечной деформации составляет (0,62–0,70), т.е. более 0,5. Для идеального металла в исходном состоянии микронесплошностей нет, поэтому  $\nu = 0,5$ , т.е. деформация, по крайней мере, на начальных этапах не должна приводить к изменению объема. Отсюда следует, что деформируя реальный металл на 2–3 % растяжением вдоль направления прокатки можно повысить плотность металла за счет закрытия микронесплошностей. Уменьшение количества микронесплошностей приводит к повышению работы возникновения и распространения трещины, и тем самым к увеличению прочности и вязкости стали.

При деформации стали, например растяжением, возникает упругая волна напряжений. Известно [4], что любую упругую волну можно представить как суперпозицию двух волн: продольной и поперечной, скорости которых вычисляются по формулам:

$$C_e = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (5)$$

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (6)$$

где  $C_e, C_t$  – скорости соответственно продольной и поперечной волн;

$E$  – нормальный модуль упругости материала;

$G$  – модуль сдвига материала;

$\rho$  – плотность материала.

Анализ данных, полученных в данной работе и опубликованных ранее [5, 6] показывает, что выполняется соотношение:

$$\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} = \left( \frac{C_t}{C_e} \right)^2, \quad (7)$$

Учитывая зависимости (5) и (6), получим:

$$\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} = \frac{G}{E} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{G}{E}. \quad (8)$$

Для стали коэффициент поперечной деформации, вычисленный по формуле (8), составляет 0,38–0,40 ( $E = 21 \cdot 10^5$  МПа,  $G = 8,1 \cdot 10^5$  МПа). Выше было экспериментально установлено, что при пластической деформации свыше (2–3) % коэффициент поперечной деформации составляет 0,36–0,38.

Из представленных зависимостей можно сделать предположение, что продольная деформация осуществляется продольными волнами, а поперечная деформация – поперечными волнами.

В области упругой деформации коэффициент поперечной деформации вычисляется по формуле [7]:

$$\nu = \frac{E - 2G}{2G} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{E}{2G} - 1. \quad (9)$$

Расчет по формуле (9) дает значение  $\nu \approx 0,3$ .

Таким образом, коэффициент поперечной деформации в упругой области меньше, чем в пластической. Коэффициент поперечной деформации характеризует степень трансформации продольной деформации в поперечную. Т.е. чем выше коэффициент поперечной деформации, тем больше поперечная деформация.

### Выводы

На основании проведенного анализа экспериментальных данных сделаны следующие выводы:

1. При пластическом деформировании растяжением до 2–3 % происходит уплотнение стали за счет закрытия ориентированных микротрещин.

2. Пластическое растяжение с последующим сжатием по жесткой схеме нагружения приводит к возникновению остаточной деформации сжатия в поперечном направлении.

3. При циклическом растяжении – сжатии по жесткой схеме нагружения с амплитудой деформации 5 % происходит накопление остаточной деформации сжатия до 3 %.

### Перечень ссылок

1. Подгайский М. С. Усовершенствование установки ИМАШ – 5с – 65. / М. С. Подгайский, А. Б. Максимов // Заводская лаборатория. – 1982. – Т. 47. – № 5. – С. 84–85.
2. Дарков А. В. Сопротивление материалов : [учеб. для студ. высш. учебн. завед.] / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро. – М. : Высшая школа, 1989. – 623 с.
3. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел ; [пер. с англ. Э. М. Надгорного] / Андре Надаи. – М. : Мир, 1989. – 863 с.
4. Ландау Л. Д. Теория упругости : [учеб. для студ. высш. учебн. завед.] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М. : Наука, 1968. – 220 с.
5. Максимов А. Б. Распространение упругих волн в композитных сталях / А. Б. Максимов // Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий. – 2005. – № 6. – С. 141–149.
6. Максимов А. Б. Особенности распространения упругих волн в композитных сталях / А. Б. Максимов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – № 1. – С. 39–42.
7. Хирт Дж. Теория дислокаций ; [пер. с англ. Ю. А. Осипьяна] / Джон Хирт, Жак Лоте. – М. : Атомиздат, 1972. – 590 с.

Одержано 16.07.2009

A. B. Maximov

## INVESTIGATION OF PLASTIC DEFORMATION UNDER CYCLIC TENSION-COMPRESSION

*Представлені дані про зміну пластичних характеристик сталі при деформації зразків у одному напрямку і циклічному за жорсткою схемою навантаження.*

**Ключові слова:** деформація, розтягнення, стиснення, циклічність, об'єм, пластичність, коефіцієнт поперечної деформації.

*Changes of steel plastic characteristics during uni-directional samples deformation under cyclic loading on a rigid scheme data was presented.*

**Key words:** deformation, tensile, compression, cyclicity, volume, plasticity, coefficient of transverse strain.

УДК 678.5-419.4:666.189.2

Д-р техн. наук Л. Р. Вишняков, О. В. Нешпор, канд. техн. наук О. В. Мазна,  
канд. техн. наук Б. М. Сінайський

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ

## УДАРНА СТІЙКІСТЬ ПРИ ШВИДКІСНИХ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ СКЛОПЛАСТИКІВ ІЗ ЕПОКСИДНОЮ МАТРИЦЕЮ

*Досліджено вплив співвідношення олігомер/отверджувач в епоксидному зв'язуючому на механічні властивості та ударну стійкість склопластиків при високошвидкісному ударному навантаженні. Показано, що збільшення вмісту отверджувача в епоксидному зв'язуючому (до 20 мас. %) збільшує ударну в'язкість композитів.*

**Ключові слова:** композиційний матеріал, полімерна матриця, склопластик, епоксидне зв'язуюче, ударна стійкість.

### Вступ

Відомо, що полімерні композиційні матеріали (ПКМ) мають високі функціональні можливості для експлуатації в екстремальних умовах [1, 2]. При створенні таких композитів особливо важливе значення надається природі та характеристикам матеріалу матриці (зв'язуючого). Саме матриця в ПКМ сприймає зовнішнє навантаження та передає його наповнювачу. Разом з тим матриця повинна перешкоджати росту тріщин, які з'являються при руйнуванні волокон [3]. Тому підвищення здатності матеріалу матриці ПКМ до пластичної деформації при збереженні міцності та модуля пружності композиту є актуальною проблемою.

Для армування ПКМ використовують різні види органічних та неорганічних волокон, ниток та волокнистих матеріалів на їх основі. Так, ПКМ на основі арамідних тканин за міцністю, ударною стійкістю і низькою вагою мають одні з найкращих захисних властивостей. У той же час композити на основі скловолокон, що також широко використовують у техніці як ударостійкі матеріали, мають привабливе поєднання

високих механічних характеристик та низької вартості скляних волокон.

Як правило, склопластики на основі термореактивних смол, а саме епоксидних, відрізняються високими показниками міцності [4]. В залежності від хімічної структури епоксидних смол, які використовують як зв'язуюче, а також типу отверджувача та співвідношення олігомер/отверджувач властивості склопластиків можуть варіюватися в широких межах [5]. Метою цієї роботи було дослідження впливу складу епоксидного зв'язуючого на механічні властивості склопластиків та визначення впливу співвідношення олігомер/отверджувач на ударну стійкість при високошвидкісному ударному навантаженні.

### Матеріали та методи дослідження

Об'єктами досліджень були полімерні композиційні матеріали на основі склотканини TG- 660 (120) (скло типу E) сатинового плетіння з поверхневою густиною 663,4 г/м<sup>2</sup>. Як матрицю для склопластиків використовували епоксидно-діанову смолу марки ЕД 20