

ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ  
ПЛОСКИХ СТАНДАРТНЫХ И ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ  
СЛОИСТОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА ОТ ИЗНАЧАЛЬНОЙ РАЗОРИЕНТАЦИИ  
НАПРАВЛЕНИЯ АРМИРОВАНИЯ

Карапетыан К.А

**Ключевые слова:** слоистый стеклопластик, стеклоткань полотняного переплетения, разориентация направления армирования, прочность, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

Karapetyan K.A

**Resistance dependence to deformation and destruction of standard plane and thin-walled tube-like elements from layered fiberglass against initial misorientation of reinforcement**

**Key words;** layered fiberglass, fiberglass of plain weave, misorientation of directed reinforcement, strength, elasticity modulus, Poisson ratio.

The question of the initial misorientation influence of reinforcement direction for resistance to deformation and destruction of standard plane and thin-walled tube-like, with recommended measures, tested samples, made of a layered fiberglass, is considered.

The obtained experimental data were analyzed and generalized from the point of view of optimal design of structural plane and thin-walled tube-like elements from a layered fiberglass on the base of plain weave fiberglass with base coating

Վարապետյան Կ.Ա.

Շերտավոր ապակեպլաստե հարթ ստանդարտ և խողովակաձև բարակապատ փորձանմուշների դեֆորմացվելուն և քայքայվելուն դիմադրելու կախվածությունը ամրանավորման ուղղության սկզբնական ապակողմնորոշումից

**Հիմնաբառեր.** Շերտավոր ապակեպլաստ, քաթան միահյուսվածքով ապակեթելեգործվածք, ամրանավորման ուղղության ապակողմնորոշում, ամրություն, առաձգականության մոդուլ, Պուասոնի գործակից

Քննարկվում է շերտավոր ապակեպլաստե ստանդարտ հարթ և հանձնարարելի չափերով խողովակաձև բարակապատ փորձանմուշների դեֆորմացվելու և քայքայվելու նկատմամբ ունեցած դիմադրողականության վրա ամրանավորման ուղղության սկզբնական ապակողմնորոշման ազդեցության հարցը:

Էքսպերիմենտալ եղանակով ստացված արդյունքները վերլուծվել և ընդհանրացվել են՝ ելնելով հենքային թելիկների ծածկմամբ քաթանային տիպի միահյուսվածքով ապակեթելեգործվածքի հիմքով շերտավոր ապակեպլաստե հարթ և խողովակաձև բարակապատ կոնստրուկցիոն տարրերի ամենանպատակահարմար նախագծման տեսանկյունից:

Рассматривается вопрос влияния изначальной разориентации направления армирования на сопротивление деформированию и разрушению стандартных плоских и тонкостенных трубчатых, с рекомендуемыми размерами, опытных образцов, изготовленных из слоистого стеклопластика.

Полученные экспериментальные данные были анализированы и обобщены с точки зрения оптимального проектирования конструкционных плоских и тонкостенных трубчатых элементов конструкции из слоистого стеклопластика на основе стеклоткани полотняного переплетения с основным перекрытием.

**Введение.** Разориентация направления армирования от проектируемого, возникающая в технологическом процессе переработки материала в изделие (технологическая или изначальная разориентация армирования), является одним из часто встречающихся макродефектов армированных композитных материалов, в том числе и армированных пластиков. Такие макродефекты могут стать причиной существенного снижения прочности и сопротивления деформированию армированных пластиков [1-4]. Это явление может более ярко выражаться у пластиков, армированных высокомодульными волокнами (боро-угле волокна) [3].

Во избежание этого недостатка предлагается установить жесткие допуски на углы армирования композитов [3]. Однако, как показывают наблюдения, даже при изготовлении в лабораторных условиях опытных образцов из слоистого стеклопластика отклонение угла армирования от заданной его величины может достигать до  $6-8^{\circ}$  [5].

В настоящей работе обсуждаются вопросы влияния технологической разориентации армирования в пределах  $6-8^{\circ}$  от предусмотренного его направления на прочность при растяжении, упругие свойства слоистого стеклопластика, установленные стандартными методами испытаний с применением плоских образцов, и на сопротивление деформированию и разрушению тонкостенных трубчатых элементов из того же материала, определенное известным методом кратковременного испытания.

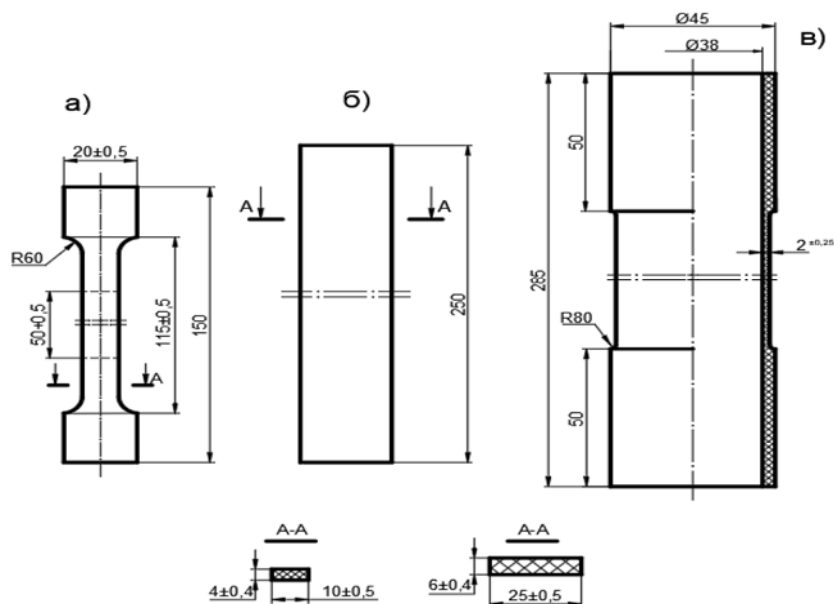
**Метод проведения исследований:** С целью установления влияния изначальной разориентации направления армирования в упомянутых выше пределах на деформативность и сопротивление разрушению при одноосном растяжении было изготовлено необходимое количество стандартных плоских и тонкостенных трубчатых, с рекомендуемыми размерами [6], образцов из одного и того же типа слоистого стеклопластика.

Опытные плоские образцы в виде двухсторонней лопатки (фиг.1.а, предназначены для определения прочности материала при растяжении), и брусков прямоугольного сечения (фиг.1.б, предназначены для определения деформативных характеристик материала), размеры которых удовлетворяют требованиям соответствующих стандартов [7] и [8], были получены методом вырезки из стеклопластиковых исходных листов с размерами в плане  $770 \times 600$  мм.

Для изготовления исходных листов методом прямого горячего прессования была использована стеклоткань полотняного переплетения с основным перекрытием [9] марки Т-23 (ТУ 6-II-231-76) толщиной 0.27 мм, с плотностью 36:20 (отношение количеств основных и утковых нитей на  $1 \text{ см}^2$  ткани), производимой Севанским заводом “Электростеклоизоляция” (Республика Армения). Связующее для стеклопластика изготавливалось на основе эпоксифенольных смол (ЭД-20 и БФ-4). Величина коэффициента армирования стеклопластика составляет  $\mu = 0.45$  ( $\mu_{\text{основа}} = 0.29$ ,  $\mu_{\text{уток}} = 0.16$ ).

Получение одной части опытных плоских образцов из исходных листов производилось таким образом, чтобы направление вырезки  $l_1$  составляло  $\varphi = 0^{\circ}$  и  $\varphi = 6^{\circ} - 8^{\circ}$  по отношению к направлению укладки основных нитей армирующей материал стеклоткани (индексация символов механических характеристик, определенных с применением этих образцов, в тексте будет обозначена через  $l_1$ ). Были

вырезаны также образцы с такими же углами ориентации, но на этот раз по отношению к направлению укладки утковых нитей (направление вырезки 22) стеклоткани (индексация символов соответствующих характеристик, установленных с использованием этих плоских образцов, будет обозначена через 22).



Фиг. 1. Опытные плоские и тонкостенные трубчатые образцы из слоистого стеклопластика.

Опытные трубчатые образцы (фиг.1.в) на основе упомянутого выше стеклотканевого препрега, как армированные симметрично (направления укладки основных нитей стеклоткани и оси труб совпадают  $\varphi = 0^\circ$ ), так и с изначально нарушенной симметрией армирования (величина угла между упомянутыми направлениями составляет  $\varphi = 6^\circ - 8^\circ$ ) были изготовлены по технологии известной в литературе как “Самопрессование” [10].

На плоских, в виде двухсторонней лопатки, опытных образцах определялись величины предела прочности при растяжении слоистого стеклопластика по взаимно-ортогональным направлениям (по направлениям вырезки образцов)  $\Pi_{11}^+$  и  $\Pi_{22}^+$ . С использованием плоских образцов в виде бруска прямоугольного сечения были установлены величины модуля упругости и коэффициентов Пуассона слоистого стеклопластика,  $E_{11}^+, \nu_{12}, \nu_{13}$  и  $E_{22}^+, \nu_{21}, \nu_{23}$ .

На трубчатых образцах определялись величины сопротивления разрушению при осевом растяжении  $\Pi_{11}^+$  и так называемого модуля упругости вдоль продольной оси образца  $E_{11}^+$  (истинная величина модуля упругости армированных пластиков определяется согласно стандарту [8]).

Испытания по определению истинных величин прочности при ратяжении и

упругих характеристик слоистого стеклопластика были осуществлены согласно стандартам [7] и [8]. Испытания трубчатых образцов на осевое растяжение производились при линейной скорости относительного движения зажимов испытательной машины  $2 \pm 0.4$  мм/мин.

Для построения диаграмм напряжение-деформация испытание плоских, в форме бруска прямоугольного сечения, и трубчатых образцов производились ступенчатым повышением растягивающего усилия с шагом, соответствующим  $0.08-0.1\Pi_{11}^+$  ( $\Pi_{22}^+$ ) и выдержкой на каждой ступени лишь на время, необходимое для взятия данных из приборов, измеряющих деформации. Измерения деформаций осуществлялись индикаторами часового типа с ценой деления 0.01мм с дублированием тензорезисторов сопротивления [11]. Повторность опытов в каждом случае была принята 6-и кратной. При этом, максимальное значение коэффициента вариации [12] полученных механических характеристик не превышало 0.11 – для прочности и 0.14 – для показателей деформации. До проведения экспериментов стеклопластиковые трубчатые образцы, как и исходные листы, из которых в дальнейшем были вырезаны плоские образцы, в течение 8 лет хранились в лабораторном помещении при средней температуре 23°C и относительной влажности 64%.

**Обсуждение полученных результатов.** До перехода к рассмотрению представленных в данной работе результатов отметим, что часть из них довольно подробно обсуждалась в работах [5] и [13]. Здесь эти результаты, дополненные новыми экспериментальными данными, рассматриваются с точки зрения оптимального проектирования плоских и трубчатых конструктивных элементов, изготовленных из слоистого стеклопластика на основе стеклоткани полотняного переплетения с основным перекрытием.

Обсудим результаты испытаний плоских образцов, осуществленных, как уже отмечалось, согласно методам, рекомендованным стандартами [7] и [8].

Согласно этим результатам разориентация армирования в пределах  $6^\circ - 8^\circ$  от нулевого его значения как по направлению укладки основных нитей вязки армирующей материал стеклоткани, так и по направлению укладки ее утковых нитей практически не влияет на прочность при растяжении стеклопластика по взаимно-ортогональным направлениям  $\Pi_{11}^+$  и  $\Pi_{22}^+$ . Средние значения этих характеристик приведены в табл.1.

Таблица 1. Результаты кратковременных испытаний плоских и трубчатых образцов из слоистого стеклопластика

Вид испытанного образца	Величина угла армирования, $\varphi^0$	Величины определенных механических характеристик							
		$\Pi_{11}^+$ , МПа	$\Pi_{22}^+$ , МПа	$E_{11} \times 10^{-3}$ , МПа	$E_{22} \times 10^3$ , МПа	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{21}$	$\nu_{23}$
плоские	0	138.0	77.0	16.2	11.4	0.155	0.196	0.165	0.204
	6-8			12.3	9.2				
трубчатые	0	146.0	---	17.65	---	---	---	---	---
	6-8		---	13.53	---	---	---	---	---

Следует отметить, что величина отношения прочностей слоистого стеклопластика по направлениям 11 и 22 (по взаимно-ортогональным направлениям)  $\Pi_{11}^+/\Pi_{22}^+ \approx 1.79$  (см. данные табл.1) практически не отличается от значения отношения количеств основных и утковых нитей на  $1\text{см}^2$  вязки армирующей материал стеклоткани (36:20-плотность стеклоткани). Это означает, что в условиях одноосного растяжения по взаимно-ортогональным направлениям слоистого стеклопластика в восприятии внешнего усилия, главным образом, участвует арматура, уложенная в этих направлениях.

Как следует из данных табл.1 в случае коэффициентов Пуассона слоистого стеклопластика, определенных в условиях одноосного растяжения по направлениям 11 и 22, можно принять, что они практически одинаковые и равны  $\nu_{12}, \nu_{21} \approx 0.16$  и  $\nu_{13}, \nu_{23} \approx 0.2$ , а также замечаем, что величины этих коэффициентов не зависят от рассматриваемых здесь углов армирования материала.

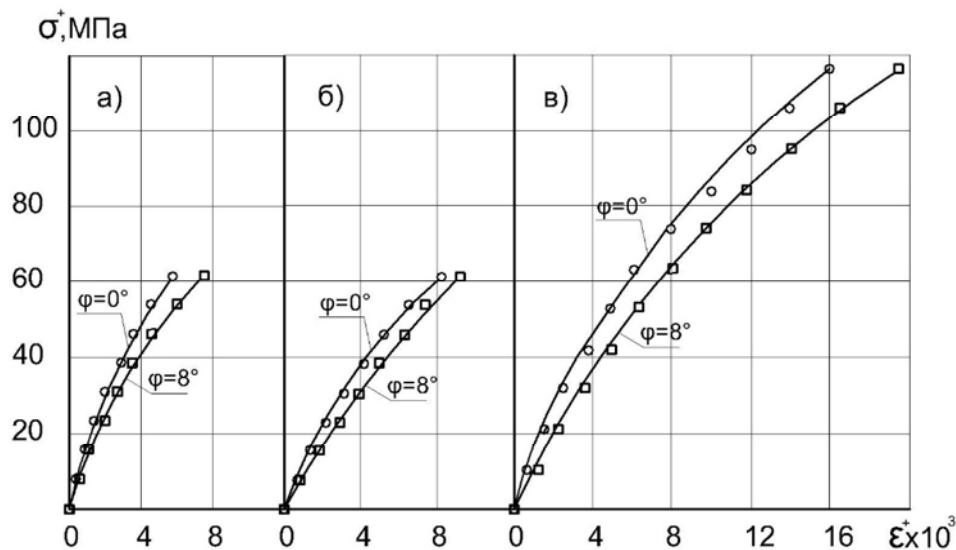
Сравнение представленных в табл.1 данных показывает, что разориентация армирования в пределах  $6^\circ - 8^\circ$  от нулевого его значения как в направлении укладки основных нитей вязки армирующей материал стеклоткани, так и в направлении укладки ее утковых нитей приводит к существенному уменьшению модуля упругости слоистого стеклопластика по взаимно-ортогональным направлениям  $E_{11}^+$  и  $E_{22}^+$ . Величина спада модуля упругости стеклопластика в упомянутом первом направлении составляет более чем 24.0%, а во втором-19.3%.

Из данных, представленных на фиг.2.а и 2.б, замечаем, что технологическая разориентация направления армирования в пределах  $6^\circ - 8^\circ$  от предусмотренного приводит к существенному увеличению податливости деформированию по взаимно-ортогональным направлениям слоистого стеклопластика при одноосном растяжении. При этом, мера увеличения упомянутой податливости, зафиксированная при одном и том же уровне растягивающего усилия, оказывается практически одинаковой по взаимно-ортогональным направлениям и составляет 20%-30% независимо от этого уровня.

Ниже рассматриваются результаты, полученные при проведении кратковременных испытаний тонкостенных трубчатых элементов из слоистого стеклопластика.

Согласно этим результатам, отклонение направления армирования в пределах  $6^\circ - 8^\circ$  от предусмотренного его нулевого значения мало влияет на предел сопротивления разрушению (прочности) при осевом растяжении трубчатых элементов из слоистого стеклопластика. Среднее значение этой характеристики приведено в табл.1.

Из сравнения данных этой таблицы, рассчитанных на основе экспериментально установленных соответствующих показателей деформации, следует, что величина так называемого модуля Юнга  $E_{11}^+$  у трубчатых образцов с симметричным армированием ( $\varphi = 0^\circ$ ) оказывается примерно на 30% больше, чем у труб с изначально нарушенной симметрией армирования ( $\varphi = 6^\circ - 8^\circ$ ).



Фиг 2. Диаграммы деформирования стеклопластиковых плоских образцов по направлениям 11(а) и 22(б) и тонкостенных трубчатых элементов по направлению оси(в).

Как замечаем из данных, приведенных на фиг. 2.в, кривая продольных деформаций стеклопластиковых труб с углом армирования  $\varphi = 6^\circ - 8^\circ$  проходит ниже аналогичной кривой, построенной для труб с  $\varphi = 0^\circ$ . Это свидетельствует об увеличении податливости деформированию стеклопластиковых труб вследствие нарушения симметричности армирования относительно оси. При этом величина отношения продольных деформаций трубчатых образцов с  $\varphi = 6^\circ - 8^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$ , зафиксированных при одном и том же уровне растягивающего усилия, составляет 1,25-1,3, и практически не зависит от уровня приложенного на испытуемый образец усилия.

Выше отмечалось, что истинные величины прочности при растяжении и модуля Юнга армированных пластиков, в том числе и стеклопластиков, определяются стандартными методами испытаний с применением опытных плоских образцов, к размерам которых предъявляются повышенные требования (см. [7] и [8]). Одновременно, в литературе, а в частности в работах [14] и [15], приводятся показатели упомянутых механических характеристик, полученных испытанием в одном случае плоских, а в другом – трубчатых опытных образцов, изготовленных из одного и того же типа армированного композита, и полученные результаты приписываются прочности и модулю Юнга материала.

Так, в упомянутой выше работе [14] приводятся результаты исследований прочности при растяжении и модуля упругости 7-ми и 13-и слойных углепластиков при угле армирования  $\varphi = 0^\circ$ , полученных применением трубчатых и плоских, в виде двухсторонней лопатки образцов. В этой работе отмечается, что в случае 7-ми слойного углепластика величины как прочности при растяжении, так и модуля упругости трубчатых образцов, оказываются существенно большими (57-62 %) по сравнению с полученными из испытаний плоских образцов. Отмечается также, что в случае 13-и слойного углепластика величины как прочности при растяжении, так и модуля упругости материала оказываются малочувствительными к форме профиля

поперечного сечения испытываемых опытных образцов. Упомянутая же выше разница в значениях одноименных механических характеристик в случае 13-и слойного углепластика составляет 3-5 % [14].

Практически такой же комментарий дается и результатам, представленным в работе [15]. Там, в частности, отмечается, что величины прочности при растяжении и модуля упругости трубчатых образцов из слоистого стеклопластика с симметричной укладкой монослоев под углами  $\pm 45^\circ$  оказываются большими, чем плоских образцов, изготовленных из того же материала.

Возвращаясь к рассмотрению результатов, приведенных в табл.1 и на фиг. 2 настоящей работе, отметим следующее.

Сопротивляемость разрушению при растяжении  $\Pi_{11}^+$  трубчатых образцов из слоистого стеклопластика оказывается примерно на 6% больше, чем прочность материала, определенная обычным стандартным методом испытания плоских образцов, независимо от рассматриваемых здесь углов их армирования (см. табл.1).

В пределах линейной области диаграммы напряжение-деформация (обычно, с использованием данных, взятых с этих участков (см. данные на фигурах 2.а и 2.в), определяют модуль упругости армированных композитов) сопротивление деформированию (характеристика  $E_{11}^+$ ) у трубчатых образцов оказывается примерно на 9-10% больше по сравнению с этой же характеристикой, определенной из стандартных испытаний плоских образцов. При этом, упомянутая разница наблюдается как в случае опытных образцов с  $\varphi = 0^\circ$ , так и в случае образцов с  $\varphi = 6^\circ - 8^\circ$ .

**Закключение.** Таким образом, в результате проведенных прямых измерений было показано, что технологическая разориентация направления армирования в пределах  $6^\circ - 8^\circ$  от предусмотренного практически не влияя на прочность (сопротивление разрушению) и величины коэффициентов Пуассона слоистого стеклопластика приводит к существенному уменьшению сопротивляемости деформированию при одноосном растяжении плоских и трубчатых элементов из такого материала.

На основе обобщения полученных результатов сформированы приведенные ниже выводы, учет которых может существенным образом способствовать оптимальному проектированию плоских и тонкостенных трубчатых элементов из слоистого стеклопластика с основным перекрытием:

- чувствительность модуля упругости слоистого стеклопластика на основе стеклоткани полотняного переплетения к технологической разориентации армирования более высока в направлении укладки основных нитей вязки ткани, чем в направлении укладки ее утковых нитей.
- вероятность того, что истинная несущая способность при осевом растяжении конструкционных тонкостенных трубчатых элементов из стеклопластика на основе стеклоткани полотняного переплетения с основным перекрытием окажется большей по сравнению с рассчитанной на основе прочности материала, установленной стандартными методами испытаний, весьма велика и, вероятность эта практически инвариантна относительно технологической разориентации армирования, возникающей в процессе переработки материала в изделие.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдман А.Я., Савельева Н.В. О напряженном состоянии и некоторых особенностях разрушения образцов стеклопластиков при растяжении под углом к направлению армирования. *Механика полимеров*. 1967, №6, с.1030-1039.
2. Розе А.В. Влияние межслойной жесткости и прочности при плоском нагружении материалов, армированных волокнами. *Механика полимеров*. 1970, №5, с.876-883.
3. Гарнопольский Ю.М., Розе А.В., Жигун И.Г., Гуняев Г.М. Конструкционные особенности материалов, армированных высокомодульными волокнами. *Механика полимеров*. 1971, №4, с.676-685.
4. Chiao C.C. Chiao T.T. Aramid Fiber and Composites. Preprint UCRI-80400, California: Livermore, 1977, 120p.
5. Карапетян К.А. О прочности и деформативных свойствах стеклопластиковых труб при повторно-статических нагружениях в зависимости от отклонений ориентации армирования. *Изв. НАН Армении, Механика*, 2001, т.54, №2, с.70-79.
6. Pagano N.J. Whitney J.M. Geometric design of composite cylindrical characterization specimens. *J.Compos. Mater*, July. 1970, p.360-378.
7. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. ГОСТ 11262-80. М.: Гостком СССР по стандартам. 1980 . 14 с.
8. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе. ГОСТ 9550-81. М.: Гос. ком. СССР по стандартам. 1981. 9с.
9. Мартынова А.А., Ятченко О.Ф., Васильев А.В. Технология изготовления тканей. М: Академия, 2007,304с.
10. Мартиросян М.М. Получение прессованных тонкостенных труб из стеклопластиков. *Промышленность Армении*. 1971, №10, с. 56-57.
11. Rothman E.A, Molter G.E. In: *Composite Materials. Testing and Design*. ASTM STP №460. Philadelphia. 1969. P. 72-82.
12. Митропольский А.К. *Техника статического вычисления*. М.: Физматгиз, 1961, 479с.
13. Карапетян К.А. Влияние начальной разориентации армирования на механическое поведение слоистых стеклопластиков при статических нагружениях. *Доклады НАН Армении*. 2005, т. 105, №3, с. 249-555.
14. Hoggat J.T. In: *Composite Materials. Testing and Design* ASTM STP №460. Philadelphia. 1969. P.48-61.
15. Арнаутов А., Бах Т. Определение сдвиговых характеристик в плоскости композитов с укладкой  $\pm 45^\circ$ . *Мех. композит. мат.* 1996, т.32, №2, с.256-264.

### Сведения об авторе

**Карапетян Кориюн Ашотович**- д.т.н., зав. лабораторией экспериментальных исследований Института механики НАН Армении  
Тел.(+37491)181097, e-mail: koryun.a.karapetyan@gmail.com

Поступила в редакцию 27.10.2023