

УДК 620.172.225

Рягін С. Л.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри механіки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ryaginzp@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МОДУЛЯ ЮНГА ЗВАРНОГО ШВА КОРОБЧАСТОЇ БАЛКИ ІЗ СТАЛІ 09Г2С

Мета роботи. Експериментальне визначення без електричної тензиметрії значень модуля Юнга при різних навантаженнях для зразка із сталі 09Г2С з повздожнім розташуванням зварного шва та для основного металу, що використовується при виготовленні коробчастих балок. Порівняння отриманих результатів між собою та з даними літературних джерел.

Методи дослідження. Експеримент, тензиметрія, метод цюнайменших квадратів.

Отримані результати. Для виготовлення зразка були зварені декілька полос металу із сталі 09Г2С, розташованих хрестообразно. З отриманої деталі був виготовлений зразок з повздожнім розташуванням зварного шва та прямокутним поперечним перерізом шляхом фрезеруванням з охолодженням. Були проведені випробування на повіреному обладнанні для визначення модуля Юнга зварного шва та основного металу. Під час експерименту деформації вимірювались важільним тензометром. Обробка експериментальних результатів здійснювалась методом цюнайменших квадратів. Отримані результати порівняні між собою та з даними літературних джерел. Встановлено, що величини модуля Юнга основного металу за всіма джерелами співставимі, але відрізняються одна від одної. Величини модуля Юнга зварного шва відрізняються принципово. За експериментальними даними іншого автора, модуль Юнга зварного шва є дещо більшим за модуль Юнга основного металу. За отриманими експериментальними даними, модуль Юнга зварного шва є дещо меншим за модуль Юнга основного металу. Ця різниця може бути пов'язана, зокрема, з різними способами виготовлення зразків для визначення модуля Юнга зварного шва.

Наукова новизна. Значення модуля Юнга для зразка із сталі 09Г2С з повздожнім розташуванням зварного шва експериментально визначено за допомогою механічної тензиметрії при різних навантаженнях та з обробкою результатів методом цюнайменших квадратів.

Практична цінність. Експериментально визначені значення модуля Юнга зварного шва та основного металу необхідні при фізичному та математичному моделюванні напруженого стану коробчастих балок із сталі 09Г2С.

Ключові слова: коробчаста балка, зварний шов, зразок, поперечний переріз, експеримент, модуль Юнга, тензометр, метод цюнайменших квадратів.

Вступ

Точність математичного моделювання є одним з факторів, що визначають майбутні характеристики технічного виробу. Однією з важливих складових забезпечення точності математичного моделювання є точність вихідних даних. Тому експериментальне визначення модуля Юнга зварного шва пов'язано з актуальним науковим та практичним завданням підвищення конкурентоздатності виробів вітчизняного кранобудування.

Аналіз досліджень та публікацій

У гіршому випадку, модуль Юнга зварного шва призначають із загальних міркувань, зокрема, як це зроблено у статті [1], що присвячена оцінці напруженого стану зварної балки методом скінчених елементів (МСЕ). Але при цьому параметри моделі все одно мають бути зкореговані за результатами експериментального дослідження напруженого стану тієї самої балки.

Інший шлях – взяти значення модуля Юнга з довідників, наприклад, [2] або [3]. Але ці дані зазвичай не збігаються між собою, та ще й відносяться до матеріалу, але не до зварного шва.

Визначення механічних характеристик саме зварного шва поширено настільки, що вивчається навіть у лабораторних роботах для студентів, наприклад, у [4] та багатьох інших. Але визначення саме модуля Юнга зварного шва автор цієї статті у таких виданнях не зустрічав.

Найбільш близьким до цієї статті є дослідження [5], у якому, зокрема, визначається модуль Юнга для зварного шва, навколошовної зони та основного металу. До того ж, в цьому дослідженні використовується зразок саме із сталі 09Г2С. Однак використовується зразок, зварений з двох половин поперечним швом, на різні зони якого прикріплені електричні тензодатчики. Поперечне розташування зварного шва при повздожньому вимірюванні не є вдалим рішенням. Електрична тензиметрія має власну похибку. А 9 вимірювань здійснювались при одному і тому ж навантаженні. Тому висновки щодо похибки біля 3 %, зроблені виходячи з статистичної обробки результатів, мають дещо теоретичний характер. Крім того, як відомо, наведені у [5] результати завдяки структурним і фазовим відмінностям у металі можуть не зовсім відповідати коробчастим балкам [6], які досліджує автор цієї статті.

Таким чином, у відомих автору цієї статті літературних джерелах немає даних щодо експериментального визначення модуля Юнга зварного шва, які могли б бути використані при подальшому дослідженні коробчастих балок із сталі 09Г2С згідно [6]. Експериментальному визначенню придатних для цього значень модуля Юнга зварного шва присвячується ця стаття.

Мета роботи

Метою цієї статті є експериментальне визначення без електричної тензиметрії значень модуля Юнга при різних навантаженнях для зразка із сталі 09Г2С з повздожнім розташуванням зварного шва та для основного металу, що використовувався при виготовленні коробчастих балок згідно [6]. Додатковою метою є порівняння отриманих результатів між собою та з даними літературних джерел.

Викладення основного матеріалу та аналіз отриманих результатів

Для виготовлення зразка із сталі 09Г2С з повздожнім розташуванням зварного шва були зварені декілька полос металу, розташованих хрестообразно. Поперечний переріз отриманої деталі для виготовлення зразка зварного шва наведений на рис.1. Застосовувалось напівавтоматичне зварювання у середовищі CO₂, товщина проволочки – 0,8 мм, її матеріал – 08Г2С. Оскільки коробчасті балки згідно [6] є фізичними моделями прогонних балок реальних мостових вантажопідійомних кранів, номінальна товщина їх стінок становить 1 мм. Тому при виготовленні деталі за рис. 1 забезпечувалось проплавлення полос металу. Із отриманої деталі зразок зварного шва виготовлявся фрезеруванням з охолодженням, його поперечний переріз приблизно показаний на рис. 1 пунктирною лінією. Тобто поперечний переріз зразка зварного шва являє собою прямокутник, за можливості наближений за розмірами до квадрата.

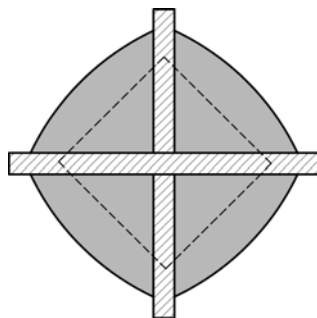


Рис. 1. Поперечний переріз деталі для виготовлення зразка зварного шва

Використання саме зразка з повздожнім розташуванням зварного шва надало принципову можливість застосувати для вимірювання деформацій механічний датчик Гугенбергера, який також називають важільним тензометром. Цей тензометр має відносно велику базу вимірювань біля 20 мм. Але, на відміну від електричних тензометрів, він має детермінований за визначенням та стабільний коефіцієнт підсилення.

Зразок основного металу являв собою звичайну полосу, яка використовувалась при виготовленні коробчастих балок згідно [6].

При підготовці та проведенні експерименту були застосовані всі можливі міри для забезпечення точності його результатів.

Випробування проводились на машині ИР-100, тарування якої було здійснено за еталонним динамометром ДС-1 (свідоцтво про повірку №5-0165-09). Деформація вимірювалась за допомогою важільного тензометра ТР (база 20 мм, коефіцієнт підсилення 1000), тарування якого було здійснено за скобою с відліковим пристроєм СР (№ 0173). Виміри геометричних розмірів зразків здійснювались за допомогою мікрометра гладкого МК (№ 0411), штангенциркуля ШЦ-II (№У667356). Випробування проводились при кімнатній температурі $t = 19\text{ }^\circ\text{C}$ (для вимірювання температури використовувався лабораторний термометр ТЛ-15).

Прямокутний поперечний переріз зразка зварного шва мав розміри 7,62×8,62 мм (площа поперечного перерізу 65,684 мм²). Розміри полоси основного металу становили 42,85×1,01 мм (площа поперечного перерізу 43,279 мм²). Навантаження здійснювалось із шагом 1 кН, з невеликим попереднім навантаженням для вибирання зазорів. Випробування основного металу здійснювались до навантаження 7 кН, бо на 8 кН почалося потрiскування. Їх результати наведені у табл. 1. Випробування зразка зварного шва здійснювались двічі до навантаження 10 кН, бо при першому випробуванні спостерігались удари, а при другому випробуванні на 11 кН почалися тремтіння та удари. Їх результати наведені у табл. 2.

Таблиця 1 – Результати випробувань для основного металу

Навантаження, кН	Покази тензометра
0	0
1	2,1
2	4,0
3	6,2
4	8,5
5	10,8
6	13,0
7	15,4

Таблиця 2 – Результати випробувань для зварного шва

Навантаження, кН	Покази тензометра	
	Випробування 1	Випробування 2
0	0	0
1	1,1	1,0
2	2,5	2,2
3	4,1	3,8
4	6,0	5,3
5	7,5	7,0
6	9,1	8,8
7	10,8	10,3
8	12,4	12,0
9	14,0	13,7
10	15,7	15,2

Удари при першому випробуванні можуть бути пов'язані, зокрема, із остаточними напруженнями у зварному шві.

На відміну від поширеної при визначенні модуля Юнга малоінформативної методики оцінки за одним виміром або оцінки за арифметичним усередненням, наприклад [7], обробка експериментальних результатів здійснювалась методом щонайменших квадратів [8]. Перевагою цього методу є не тільки більш повне врахування статистичної інформації, а й можливість зв'язати цю статистичну інформацію із емпіричною функцією, що відповідає вирішуваній задачі. У цьому випадку, в якості емпіричної функції природньо була обрана пряма нахильна лінія, що проходить через початок координат. Обчислення модуля Юнга проводились за формулою:

$$E = \frac{\sum \left(\frac{P_i \cdot a_i}{F \cdot a} \right)}{\sum \left(\frac{a_i}{a} \right)^2}, \quad (1)$$

де E – модуль Юнга, Па;
 P_i – поточне навантаження, Н;
 F – площа поперечного перерізу, м²;
 a_i – поточний показ тензметра, мм;
 $a = 20$ мм – база тензметра.

Результати обчислень для основного металу наведено на рис. 2, для зварного шва – на рис. 3. На рис. 3 нижня лінія відповідає випробуванню 1, верхня – випробуванню 2. Отримані результати зведено у табл. 3.

Порівняння даних табл. 3 дає можливість зробити певні висновки. Величини модуля Юнга основного металу за всіма джерелами співставимі, але відрізняються одна від одної. Величини модуля Юнга зварного шва відрізняються принципово. За даними дисертації [5], модуль Юнга зварного шва є дещо більшим за модуль Юнга основного металу. За експериментальними даними цієї статті, модуль Юнга зварного шва є дещо меншим за модуль Юнга основного металу. Ця різниця може бути пов'язана, зокрема, з різними способами виготовлення зразків для визначення модуля Юнга зварного шва.

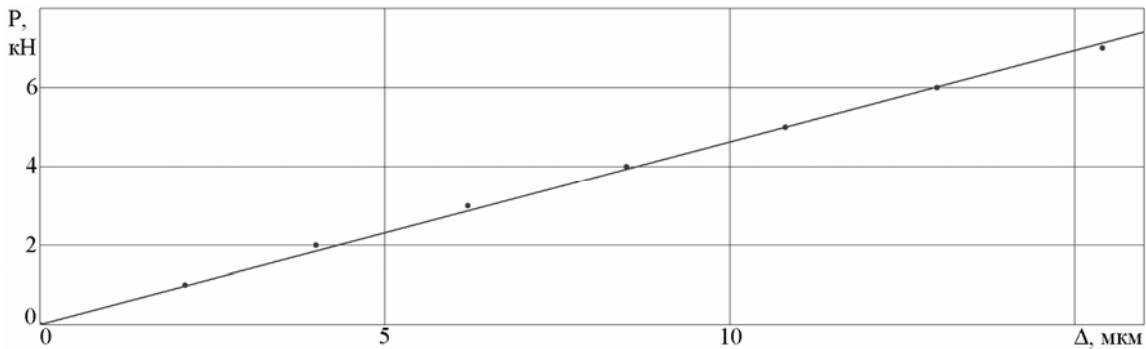


Рис. 2. Визначення модуля Юнга для основного металу

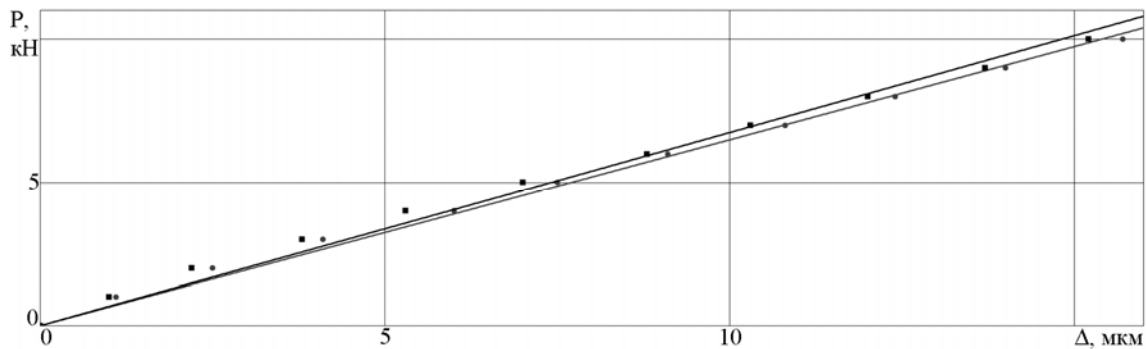


Рис. 3. Визначення модуля Юнга для зварного шва

Таблиця 3 – Результати визначення модуля Юнга

Модуль Юнга E, ГПа	Джерело			
	Довідник [2]	Довідник [3]	Дисертація [5]	Експеримент
Зварний шов	–	–	225 (219–231)	197,7 / 205,4
Околошовна зона	–	–	183 (175–192)	–
Основний метал	210	200	198 (191–203)	213,8

Різниця між величинами модуля Юнга зварного шва 197.7 ГПа та 205.4 ГПа, отриманими при двох послідовних випробуваннях, при наявній підготовці до забезпечення точності експерименту, скоріше може бути пов'язана із внутрішніми змінами зразка, що відбулись під час першого випробування та викликали відповідні удари.

Висновки

Таким чином, було експериментально визначено шляхом механічної тензиметрії при різних навантаженнях значення модуля Юнга для зразка із сталі 09Г2С з повздожнім розташуванням зварного шва та для основного металу, що використовується при виготовленні коробчастих балок. Отримані результати мають певну різницю як між собою, так і з даними літературних джерел.

У перспективі автор цієї статті планує більш докладно проаналізувати фактори, що впливають на значення модуля Юнга, а також обґрунтувати застосування зведеної величини модуля Юнга, придатної для використання при моделюванні незалежно від дії вищезазначених факторів.

Список літератури

1. Гончарова О. Е. Оценка напряженно-деформированного состояния сварной балки оси мобильной машины [Электронный ресурс] / О. Е. Гончарова, В. Г. Максимов // Труды Одесского политехнического университета. – Выпуск 1(5). – 1998. – Режим доступа: http://storage.library.opu.ua/online/periodic/opu_1998_1%285%29/1_53.htm.

2. Расчеты на прочность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stresscalc.ru/ex.php?mat=09%C32%D1&get=1>.

3. Справочник сталей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.konarspb.ru/steel-09g2s>.

4. Лабораторный практикум по дисциплине «Проектирование сварных конструкций» / сост. А. Ю. Медведев, М. П. Савичев. – Уфа : Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2015. – 32 с.

5. Василенко Д. А. Совершенствование методов расчета сопротивления усталости сварных соединений рам длиннобазных вагонов-платформ [Текст] : дис.: канд. техн. наук: 05.22.07: защищена 2010 г. / Василенко Дарья Андреевна. – СПб., 2010. – 106 с. – 04201057385.

6. Григоров О. В. Підготовка фізичного моделювання коробчастих головних балок мостових кранів / О. В. Григоров, С. Л. Рягін // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2007. – № 17. – С. 63–69.

7. Цурпал И. А. Сопротивление материалов. Лабораторные работы / И. А. Цурпал, Н. П. Барабан, В. М. Швайко. – К. : Вища школа, 1978. – 192 с.

8. Демидович Б. П. Численные методы анализа / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – М. : Физматлит, 1963. – 400 с.

Одержано 28.04. 2022

Ryagin S. Experimental finding of weld Young's modulus of a weld box girder made of steel 09Г2С

Purpose. *Experimental finding of Young's modulus values of the specimen of steel 09Г2С with weld longitudinal arrangement and of the basic metal, which is used for box girder manufacturing, by means of non-electrical strain measurement under various loads. Comparison of the received results among themselves and with data of references.*

Methods of research. *Experiment, strain measurement, least-squares technique.*

Results. *Several metal strips of steel 09Г2С arranged crosswisely have been welded for making of a specimen. The specimen of steel 09Г2С with weld longitudinal arrangement and rectangular cross-section has been produced of the received detail by milling with cooling. Tests have been executed on calibrated equipment for finding of Young's modulus values of the weld and of the basic metal. Strains have been measured by Huggenberger tensometer during experiment. Experimental results have been processed by least-squares technique. The received results have been compared among themselves and with data of references. It has been found out, that Young's modulus values of the basic metal on all references are comparable, but differ one from another. Young's modulus values of the weld differ essentially. Weld Young's modulus is a little bigger than basic metal Young's modulus according to experimental data of other author. Weld Young's modulus is a little smaller than basic metal Young's modulus according to the received experimental data. This difference can be explained, in particular, by different ways of production of specimens for finding of weld Young's modulus.*

Scientific novelty. *Young's modulus values of the specimen of steel 09Г2С with weld longitudinal arrangement has been experimentally found by means of mechanical strain measurement under various loads and with result processing by least-squares technique.*

Practical value. *Experimentally found Young's modulus values of the weld of the basic metal are necessary at physical and mathematical modelling of a stress state of a box girders of steel 09Г2С.*

Key words: *box girder, weld, specimen, cross-section, experiment, Young's modulus, tensometer, least-squares technique.*