

УДК 539.3: 331.45: 685.7

С. В. КУЦЕНКО, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, Д. С. МУХІН

ДО ПИТАННЯ ВИКОНАННЯ БАГАТОВАРІАНТНИХ РОЗРАХУНКІВ НА МІЦНІСТЬ НА ПРИКЛАДІ КАРАБІНІВ

У роботі проводиться серія розрахунків напружено-деформованого стану конструкції методом скінченних елементів. Метою цих розрахунків є аналіз впливу низки геометричних параметрів на напружено-деформований стан. Даний аналіз проводиться для пошуку раціональних меж проектних параметрів з точки зору міцності. Серія розрахунків включає в себе поодинокі варіювання одним з параметрів. Об'єктом дослідження виступає сталевий туристичний карабін у формі трапеції. На завершення статті проводиться аналіз отриманих даних.

Ключові слова: метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, параметричний аналіз, альпінізм, елементи страховки, індивідуальне спорядження, карабін.

В работе проводится серия расчетов напряженно-деформированного состояния конструкции методом конечных элементов. Целью этих расчетов является анализ влияния ряда геометрических параметров на напряженно-деформированное состояние. Данный анализ проводится для поиска рациональных границ проектных параметров с точки зрения прочности. Серия расчетов включает в себя поединичное варьирование одним из параметров. Объектом исследования выступает стальной туристический карабин трапециевидной формы. В заключение статьи проводится анализ полученных данных.

Ключевые слова: метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, параметрический анализ, альпинизм, элементы страховки, индивидуальное снаряжение, карабин.

In this work, a series of calculations of structure stress-strain state by the finite element method is conducted. The objective of these calculations is to analyze the influence of some geometrical parameters on stress-strain state. This analysis is performed to find the boundaries of rational design parameters in terms of strength. Calculations series includes a single variation of one parameter. The object of research is steel tourist carbine of trapezoidal shape. This object has five main parameters: the length of longitudinal portion of the carbine, the sectional diameter, the height, the radius of the arc bending and longitudinal section. Each parameter varies 4-5 times in range 0.5 to 1.5 from baseline value. For each of parameters static strength calculations were performed. The results are displayed in graphs and tabulated. The influence of each parameter was analyzed. For each parameter recommendations were issued for practical application. Finally, the paper presents conclusions and specifies ways for further research. The path is represented for further automation of calculation process for simplification and more detailed analysis of some aspects of design parameters.

Keywords: finite element method, stress-strain state, parametric analysis, alpinism, climbing belay elements, personal equipment, carbine.

Вступ

У попередній статті [1] було проведено дослідження застосовності різних матеріалів для виготовлення карабінів, так само були визначені раціональні розміри скінченно-елементної сітки. Даний напрямок досліджень має свою актуальність, оскільки від надійності індивідуального спорядження безпосередньо залежать життя людей [2–6]. Запобігання травматизму або смерті людей під час виконання своїх обов'язків має дуже важливе значення для створення безпечних умов життя і здоров'я [7–8]. Особливо це важливо для ситуацій, що пов'язані з екстремальними умовами: альпінізм, туризм, рятувальні операції, військова справа. Нещасні випадки були і залишаються трагедією. Для запобігання травматизму розроблено безліч нормативних документів, розпорядчих правил поведінки і використання обладнання [7–8]. Але дана задача вимагає проектного пошуку параметрів, котрі при зменшенні витрат на виготовлення збережуть або збільшать надійність конструкції. Тому в даній статті виділені основні геометричні параметри карабіна і за ними проведений пошук оптимальних конструктивних характеристик для даного типу конструкцій. Як і в попередній роботі, дослідження буде проходити на базі туристичного карабіна у формі трапеції.

Постановка задачі

Дослідження надійності особистого спорядження буде виконуватись на основі геометричної моделі туристського сталевго карабіну у формі трапеції з муфтованою засувкою. Основними параметрами для варіювання будуть: довжина поздовж-

ньої частини карабіна, діаметр перетину, висота, поздовжній зріз і радіус вигину дуги (рис. 1). Кожен з параметрів змінювався в межах від 0,5 до 1,5 відносно початкового значення (табл. 1).

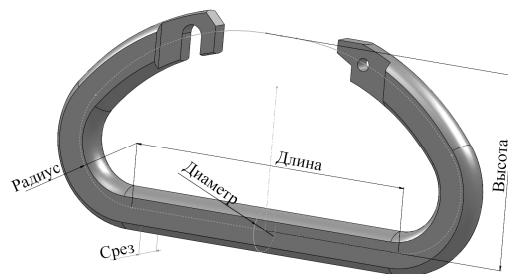


Рисунок 1 – Основні варійовані параметри

Таблица 1 – Межі варіювання параметрів

Назва параметру	1	2	3	4	5
Довжина, мм	40	52	70*	87	105
Діаметр перетину, мм	6	8	10*	12	15
Висота, мм	34	45*	56	67	–
Поздовжній зріз, мм	4	6	8*	10	–
Радіус дуги, мм	7	11	15*	19	22

Примітка: * – початкове значення параметрів

Задача складається у проведенні багатопараметричного аналізу для пошуку раціональних меж

проектних параметрів з точки зору перевищення напруженнями межі текучості і витривалості та розробки рекомендацій щодо автоматизованої системи дослідження напружено-деформованого стану карабінів.

У рамках поточної роботи об'єкт розглядається у відкритому незамуфтованому положенні через те, що в такому стані карабін витримує значно менші навантаження, ніж у інших. Саме тому такий стан вважається найбільш небезпечним для життя людини [1, 6–8]. Карабін може знаходитися в такому стані при зчепленні/розчепленні різних вузлів і згідно з ДСТУ EN 362–2001 [8] повинен проходити перевірку у відкритому положенні. З метою зменшення ресурсоемності завдання, розрахункова модель була спрощена до однієї дуги без механізму замикавання.

Як було зазначено раніше, переважна більшість характеристик матеріалів, що застосовуються при виготовленні карабінів, є комерційною таємницею. Але через те, що робота присвячена дослідженню впливу геометричних параметрів на напружено-деформований стан конструкції, то для тестових розрахунків була взята високоміцна загартована сталь з межею міцності не менше 800 МПа. Такі сталі здебільшого мають модуль пружності, близький до $1,9 \cdot 10^{11}$ Па і коефіцієнт Пуассона, який дорівнює 0,3 (табл. 2). Густина, взята для обчислення маси – 7800 кг/м³. Додатково результати розрахунків порівнюються з переліком матеріалів, наведеним в попередній роботі [1].

Таблиця 2 – Приклади характеристик матеріалів

№	Матеріал	σ_r , МПа	σ_t зміцнення, МПа	σ_b , МПа	σ_v зміцнення, МПа	E , ГПа	μ
1	Ст3	185-250	250-350	380-490	380-490	2,05	0,27
2	Сталь45	245-395	410-830	470-690	610-980	2,0	0,31
3	30Г2	375	375	590	590	1,98	0,33
4	30ХНЗМ2ФА	750	750	900	900	1,95	0,28
5	Сталь85	980	1650	1130	1750	1,91	0,31
6	50ХГ	1177	1177	1275	1275	1,85	0,3
7	30ХГСН2А	1375	1500	1620	1900	1,95	0,29

Умови закріплення та навантаження у вигляді сили в 7000 Н уздовж поздовжньої осі карабіна зображені на рис. 2. Таке навантаження зумовлене середнім значенням граничного навантаження при відкритій засувці для даного виду карабінів.

Також на основі досліджень, проведених раніше [1], раціональним розміром скінченно-елементної сітки для даного типу конструкцій є розмір 2 мм. Такий розмір забезпечує задовільну точність і збіжність, забезпечуючи при цьому високу швидкість розрахунку.

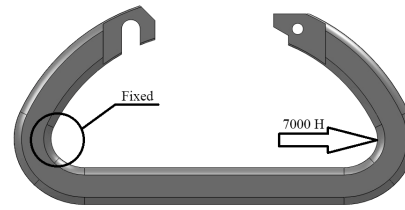


Рисунок 2 – Граничні умови

Результати розрахунків

Для того, щоб мати базу для аналізу, була проведена низка розрахунків при різних характерних розмірах. Варіювання при цьому відбувалося за одним параметром, інші приймали початкове значення. Конструкція перебувала під дією сили, прикладеної на одну з поверхонь. Протягом розрахунків не змінювалися характеристики матеріалу, закріплення, тип та розмір скінченного елемента. Через зміни і перебудову геометрії при варіюванні параметрами поверхні навантаження і закріплення іноді змінювали свою площу і відносне розташування.

Як зазначалось у попередній статті [1], порівнювати напруження за максимальним значенням не зовсім доречно. Скінченно-елементна сітка обумовлює появу концентраторів напружень, пов'язаних з розмірністю сітки, а не тільки з особливостями конструкції. Також поза комп'ютерними розрахунками не існує абсолютно жорстких умов закріплення та ідеально пружних матеріалів. Ці чинники зумовлюють появу концентраторів напружень, які в реальній конструкції будуть проявлятися в меншому обсязі. Згідно з європейською термінологією, hotspots stress (HS) – напруження в концентраторах і general stress (GS) – загальний напружений стан без урахування концентраторів. Загальний напружений стан визначався шляхом точкового виміру напружень безпосередньо біля місця концентратора та апроксимації отриманих значень.

Початковими значеннями параметрів були: довжина – 70 мм, поздовжній зріз – 8 мм, висота – 45 мм, діаметр перетину – 10 мм, радіус дуги – 15 мм. При цьому напруження у концентраторі (HS) становили 1000 МПа та 762 МПа поза його межами (GS). Переміщення склали 3,67 мм, а маса – 112,76 г. Доречно зазначити, що під масою тут і далі мається на увазі тільки скоба, без урахування засувки і кріплення. Картина розподілу напружень для початкових значень наведена на рис. 3.

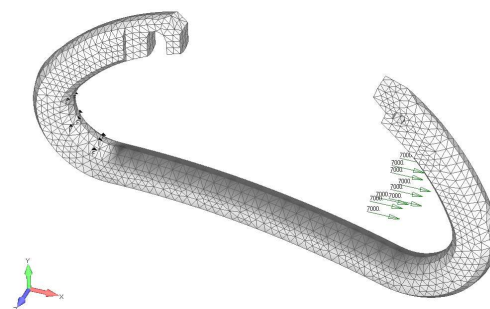


Рисунок 3 – Напруження за Мізесом

Нижче наведені графіки залежності маси, напружень і переміщень від досліджуваного параметра. Маса була включена в дані графіки для того, щоб визначити доцільність варіювання параметром. По горизонтальній осі відкладені зміни розміру в частках. Тобто безрозмірна величина, що показує, на скільки збільшили або зменшили певний розмір. На графіках трикутними точками позначені переміщення, квадратними – напруження, круглими – маса скоби карабіна.

Початкове значення параметру "поздовжній зріз" (рис. 4) було 8 мм. При зміні параметра від 4 до 10 мм напруження змінювалися від 1460 до 820 МПа у концентраторі (HS) та від 885 до 574 МПа поза його межами (GS); переміщення складали від 5,35 до 2,45 мм; маса – від 62,62 до 120,98 г відповідно. Всі результати варіювання даним параметром наведені в табл. 3. Також в таблиці наведені мінімально допустимі сталі, опираючись на дані табл. 1. Для спрощення тут і далі наводиться номер сталі.

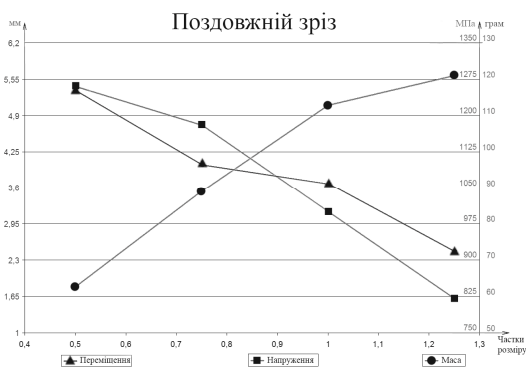


Рисунок 4 – Параметр "поздовжній зріз"

Таблиця 3 – Результати розрахунків для параметру "поздовжній зріз"

Назва параметру	1	2	3	4
Значення параметру, мм	4	6	8	10
Значення в частках	0,5	0,75	1	1,25
Маса, г	62,62	88,95	112,76	120,98
Переміщення, мм	5,35	4,02	3,67	2,45
Напруження HS, МПа	1260	1180	1000	820
Напруження GS, МПа	885	826	762	574
Допустима сталь, №	5	5	2	2

Початкове значення параметру "висота" (рис. 5) було 45 мм. При зміні параметра від 34 до 67 мм напруження у концентраторі (HS) змінювалися від 1110 до 630 МПа та від 785 до 410 МПа поза його межами (GS); переміщення складали від 4,59 до 2,98 мм; маса – від 104,65 до 130,59 г відповідно. Всі результати варіювання даним параметром наведені в табл. 4. Також в таблиці наведені мінімально допустимі сталі, спираючись на дані в табл. 1.

Початкове значення параметру "діаметр перетину" (рис. 6) було 10 мм. При зміні параметра від 6 до 15 мм напруження у концентраторі (HS) змінювалися від 3060 до 572 МПа та від 2400 до 205 МПа поза його межами (GS); переміщення складали від 16,7 до 1,09 мм; маса – від 45,1 до 177,72 г відповідно. Всі результати варіювання даним параметром наведені в табл. 5. Також в таблиці наведені мінімально допустимі сталі (див. табл. 1).

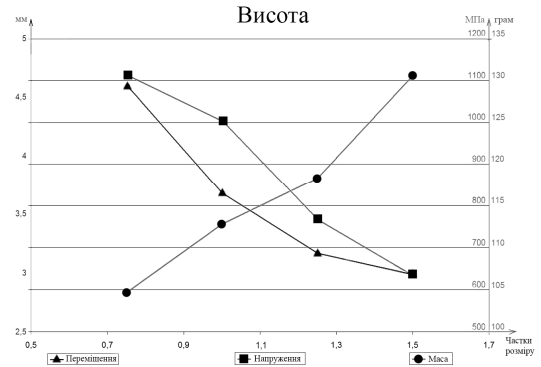


Рисунок 5 – Параметр "висота"

Таблиця 4 – Результати розрахунків для параметру "висота"

Назва параметру	1	2	3	4
Значення параметру, мм	34	45	56	67
Значення в частках	0,75	1	1,25	1,5
Маса, г	104,65	112,76	118,28	130,59
Переміщення, мм	4,59	3,67	3,16	2,98
Напруження HS, МПа	1110	1000	765	632
Напруження GS, МПа	785	762	525	410
Допустима сталь, №	2	2	2	2

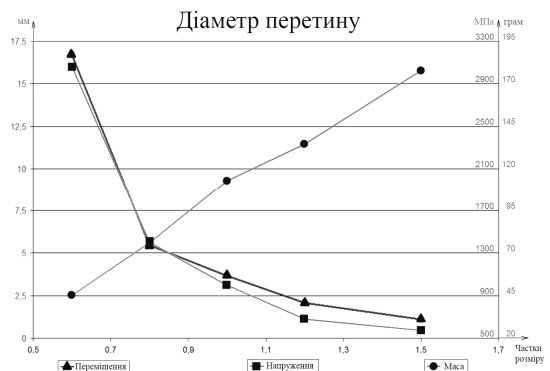


Рисунок 6 – Параметр "діаметр перетину"

Початкове значення параметру "довжина" (рис. 7) було 70 мм. При зміні параметра від 40 до 105 мм напруження у концентраторі (HS) змінювалися від 1050 до 951 МПа та від 782 до 733 МПа поза його межами (GS); переміщення складали від 1,99 до 5,65 мм; маса – від 104,65 до 130,59 г відповідно. Всі результати варіювання даним параметром

наведені в табл. 6. Також в таблиці наведені мінімально допустимі сталі згідно з даними табл. 1.

Таблиця 5 – Результати розрахунків для параметру "діаметр перетину"

Назва параметру	1	2	3	4	5
Значення параметру, мм	6	8	10	12	15
Значення в частках	0,6	0,8	1	1,2	1,5
Маса, г	45,1	76,21	112,76	134,61	177,72
Переміщення, мм	16,7	5,45	3,67	2,07	1,09
Напруження HS, МПа	3060	1400	1000	580	415
Напруження GS, МПа	2400	1030	762	390	205
Допустима сталь, №	-	5	2	2	1

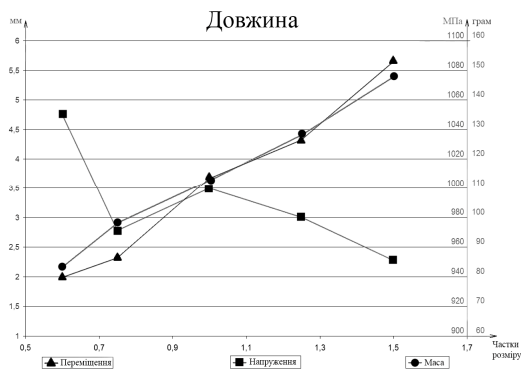


Рисунок 7 – Параметр "довжина"

Таблиця 6 – Результати розрахунків для параметру "довжина"

Назва параметру	1	2	3	4	5
Значення параметру, мм	40	52	70	87	105
Значення в частках	0,6	0,75	1	1,25	1,5
Маса, г	83,25	98,15	112,76	128,25	147,77
Переміщення, мм	1,99	2,32	3,67	4,32	5,65
Напруження HS, МПа	1050	971	1000	980	951
Напруження GS, МПа	782	742	762	733	750
Допустима сталь, №	2	2	2	2	2

Початкове значення параметру "радіус дуги" (рис. 8) було 15 мм. При зміні параметра від 7 до 22 мм напруження у концентраторі (HS) змінювалися від 2500 до 708 МПа та від 1250 до 434 МПа поза його межами (GS); переміщення – від 7,61 до 1,97 мм; маса – від 95,14 до 128 г відповідно.

Всі результати варіювання даним параметром наведені в табл. 7. Також в таблиці наведені мінімально допустимі сталі (див. табл. 1).

У всіх розрахунках характер деформацій і загальні картини розподілу напружень залишалися незмінними. Для прикладу наведено результат розподілу напружень за Мізесом з варіюванням параметра "радіус дуги" (рис. 9).

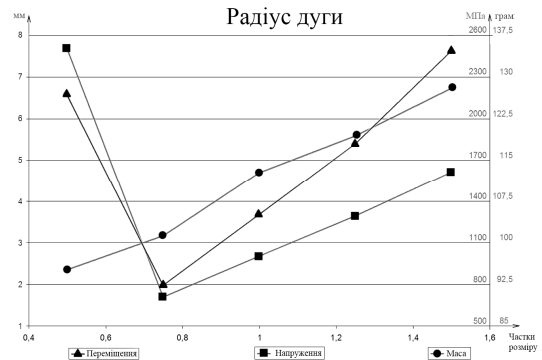


Рисунок 8 – Параметр "радіус дуги"

Таблиця 7 – Результати розрахунків для параметру "радіус дуги"

Назва параметру	1	2	3	4	5
Значення параметру, мм	7	11	15	19	22
Значення в частках	0,5	0,75	1	0,15	1,5
Маса, г	95,14	101,31	112,76	119,46	128
Переміщення, мм	6,56	1,97	3,67	5,38	7,61
Напруження HS, МПа	2500	708	1000	1290	1610
Напруження GS, МПа	1250	434	762	895	1170
Допустима сталь, №	7	2	2	5	7

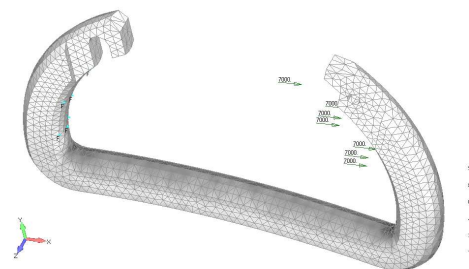


Рисунок 9 – Параметр "радіус дуги", 7 мм

Аналіз отриманих результатів

Розрахунки показали, що деякі параметри більшою мірою позитивно впливають на НДС конструкції. Так, при збільшенні діаметру перетину (див. рис. 6, табл. 5) значення напружень значно знижуються. Це, в свою чергу, призводить до збі-

льшення загальної маси конструкції, але з урахуванням того, що це дозволить застосовувати для виготовлення марки сталей з низьким запасом міцності. Даний варіант призведе до зниження вартості виробництва і може використовуватися в галузях і напрямках, де спорядження транспортується переважно технікою (МНС, військові та рятувальні операції, і т.д.).

Параметр довжина (див. рис. 7, табл. 6) практично не впливає на напружено-деформований стан конструкції, як наслідок, ним можна відносно вільно варіювати з точки зору міцності конструкції. При цьому варто відзначити, що даний параметр може мати велику значимість для конструкції через те, що він впливає на розміри засувки, яка не враховується в даному дослідженні. А її розміри, в свою чергу, впливають на зручність та можливість користування.

Використання і застосування бічного поздовжнього зрізу приносить значне полегшення конструкції, але при цьому сильно і прямо пропорційно зменшує міцність даного типу конструкції (див. рис. 4, табл. 3). Його застосовність можлива і доцільна спільно з використанням зміцнюючих конструктивних елементів, наприклад, додаткових локальних ребер жорсткості в слабких місцях конструкції. В даному випадку існує необхідність додаткового дослідження, яке б більш детально і точно визначало раціональні межі варіювання і використання даного параметра у сукупності зі зміцнюючими елементами.

Радіус дуги (див. рис. 8, табл. 7) незначною мірою впливає на масу, але при цьому значно змінює геометрію деталі, тим самим змінюючи характер навантаження і, як наслідок, впливає на напружено-деформований стан. Оскільки графік залежності напружень від даного параметра має точку перегину, то вимагає більш детального дослідження зі значно більш дрібним кроком варіювання в околі даної точки.

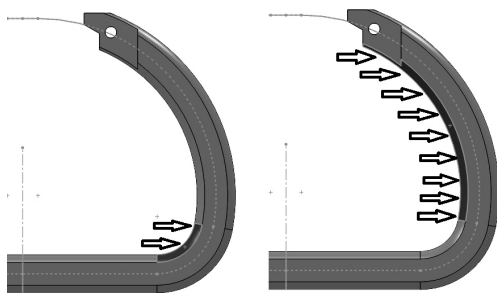


Рисунок 10 – Можливі варіанти навантаження

При варіюванні параметром висота (см. рис. 5, табл. 4) виник ряд додаткових питань. По-перше, варіювання даним параметром без урахування засувки не зовсім доречно. По-друге, оскільки навантаження і закріплення задавалися до поверхонь, то в даній низці розрахунків проявилася нефізичність, пов'язана з тим, що прикладені граничні умови пе-

ребували вище або нижче тих місць, де в реальності розташовувалися б точки закріплення і навантаження (рис. 10, 11).

Це призвело до того, що важіль прикладеної сили задавався невірно, що, відповідно, призвело до помилкових і невірних результатів розрахунків. Для даного параметра необхідний перерахунок результатів з урахуванням виявлених недоліків.

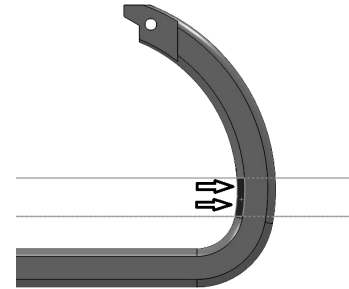


Рисунок 11 – Місце реального навантаження

Висновки

У роботі були проведені дослідження впливу конструктивних параметрів на НДС конструкції. Встановлено, які з обраних конструктивних параметрів більшою мірою впливають на міцність і НДС конструкції: діаметр перетину, радіус дуги та поздовжній зріз. Так само встановлена залежність маси карабіна від позначених параметрів.

В ході дослідження було встановлено доцільність розробки і створення методів автоматизації процесу перебудування геометрії і подальшого її розрахунку. Це дозволить більш детально і з меншим кроком досліджувати як проблемні місця, виявлені в ході даного дослідження, так і конструкцію в цілому. Так само з'явиться можливість синтезу і дослідження конструкцій з декількома одночасно змінними параметрами, що значно розширить область вивчення. Так само доцільно більш детально вивчити питання концентраторів напружень та розробити методику їх автоматизованого виявлення та можливості аналізувати конструкцію як з їх урахуванням, так і без нього.

При впровадженні даних досліджень в практичне застосування може знадобитися розв'язання задачі аналізу та синтезу в більш точній постановці за рахунок більш високих вимог до спорядження і його використання. Для більш точного розв'язання задачі аналізу та синтезу параметрів досліджуваних об'єктів (в даному випадку карабінів) після пошуку первинних зон для допустимих параметрів слід проводити повторні дослідження в уточненій постановці: карабін моделювати як складальний об'єкт з урахуванням всіх наявних деталей і контактів між ними, використовувати моделі матеріалів з урахуванням їх нелінійної поведінки, проводити розрахунки на багатоциклову і динамічну міцність. Так само необхідно розраховувати модель за всіма застосованими до неї вимогами і регламентами, описаними у низці документів з випробувань і допуску до

використання [7, 8].

Список літератури

- 1 **Куценко С.В.** Дослідження міцності індивідуального спорядження шляхом комп'ютерного моделювання НДС на прикладі карабінів / **С.В. Куценко, А.Ю. Васильєв, Д.С. Мухін, Ю.К. Васильєв** // Вісник НТУ "ХПІ", – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017 (у друку).
- 2 **Васильєв А.Ю.** К вопросу исследования надежности индивидуального снаряжения / **А.Ю. Васильєв, Ю.К. Васильєв** // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – Вып. 53. – С. 35–39.
- 3 **Бондаренко О.В.** Проектування засобів організації штучних точок страхівки та опори для альпінізму / **О.В. Бондаренко** // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – № 31 (1140). – С. 20–28.
- 4 **Scott V.** Design of a composite carabiner for rock climbing / **Scott V.** – 2008.
- 5 **M. Walk** Strain/displacement of a carabiner via interferometry / **M. Walk** // Laser Interferometry. – X, 4101, 409–417 (2000).
- 6 **Okal M.** Carabiner Testing / **Okal M.** // 16.621 Final Report. – 2001. – С. 8–10.
- 7 Сертифікація снаряження. Стандарти. – <http://krok.biz/info/docs/gosty>
- 8 **ДСТУ EN 362–2001.** Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. З'єднувачі.

References (transliterated)

- 1 **Kutsenko S.V.** Strength investigation of individual equipment based on example of carabines stress state computer simulation./ **S.V. Kutsenko, A.Yu. Vasiliev, D. M. Mukhin, Yu. K. Vasiliev** // Bulletin of NTU "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, (In press)
- 2 **Vasil'yev A.Yu.** K voprosu issledovaniya nadezhnosti individual'nogo snaryazheniya / **A.Yu. Vasil'yev, Yu. K. Vasil'yev** // Vestnik NTU "KHPI". – Khar'kov: NTU "KhPI", 2005. – No 53. – P 35–39.
- 3 **Bondarenko O.V.** Proyektuvannya zasobiv organizatsii shtuchnikh tochok strakhovki ta opori dlya al'pinizmu / **O. V. Bondarenko** // Visnik NTU "KhPI". – Kharkov : NTU "KhPI", 2015. – № 31 (1140). – P. 20–28.
- 4 **Scott V.** Design of a composite carabiner for rock climbing.– 2008.
- 5 **M. Walk** Strain/displacement of a carabiner via interferometry / **M. Walk** // Laser Interferometry. – X, 4101, 409–417 (2000).
- 6 **Okal M.** Carabiner Testing // 16.621 Final Report. – 2001. – С. 8–10.
- 7 Certification of equipment. Standards. – <http://krok.biz/info/docs/gosty>
- 8 **DSTU EN 362–2001.** Individual'ne sporyadzhennya dlya zakhistu vid padinnya z visoti. Z'ednuvachi.

Поступила (received) 05.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

До питання виконання многоваріантних розрахунків на міцність на прикладі карабінів / С.В. Куценко, А.Ю. Васильєв, Д.С. Мухін // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: НТУ "ХПІ", 2017. – № 12 (1234). – С. 49–54. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0775.

К вопросу выполнения многовариантных прочностных расчетов на примере карабинов / С.В. Куценко, А.Ю. Васильєв, Д.С. Мухін // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2017. – № 12 (1234). – С. 49–54. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0775.

To a question of multivariant calculations of the strength on the example of carabiners / S.V. Kutsenko, A.Yu. Vasiliev, D.M. Mukhin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Engineering and CAD. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 12 (1234). – P. 49–54. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0775.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Куценко Сергій Володимирович – НТУ "ХПІ", викладач-стажист кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; Харків, e-mail: skutsenko@tmm-sapr.org.

Куценко Сергей Владимирович – НТУ "ХПИ", преподаватель-стажер кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; Харьков, Украина; e-mail: skutsenko@tmm-sapr.org.

Kutsenko Serhii – NTU "KhPI", teacher-trainee of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv; e-mail: skutsenko@tmm-sapr.org

Васильєв Антон Юрійович – кандидат технічних наук, НТУ "ХПІ", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", Харків; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Васильєв Антон Юрьевич – кандидат технических наук, НТУ "ХПИ", докторант кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин", Харьков; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Vasiliev Anton – Ph.D., NTU "KhPI", doctorante of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Мухін Дмитро Сергійович – НТУ "ХПІ", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; Харків, Україна; e-mail: s814@tmm-sapr.org.

Мухин Дмитрий Сергеевич – НТУ "ХПИ", аспирант кафедры "Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин"; Харьков, Украина; e-mail: s814@tmm-sapr.org

Mukhin Dmitriy – NTU "KhPI", postgraduate of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, Kharkiv; e-mail: s814@tmm-sapr.org