

УДК 621.926:621.791

Святослав Фик, аспірант

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

**ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ БАГАТОШАРОВИХ ЗВАРНИХ ШВІВ У ВУЗЛІ
КРІПЛЕННЯ НОЖІВ ДО ВАЛІВ ДВОХВАЛЬНОГО ШРЕДЕРА ДЛЯ
ЗМЕНШЕННЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ**

Анотація. У роботі досліджено напружено-деформований стан вузла кріплення ножів до валів двовального шредера за умов короткочасних перевантажень і циклічної дії навантаження. Обґрунтовано доцільність застосування нероз'ємного зварного з'єднання як більш жорсткого і конструктивно простішого порівняно з болтовим. Показано, що найбільш небезпечними зонами є ділянки переходу багатошарового зварного шва в тіло ножа, де формуються локальні концентратори напружень. Запропоновано підхід до оптимізації форми багатошарових швів, який передбачає плавне профілювання зовнішнього контуру, зміщення шарів та мінімізацію різких геометричних переходів. Реалізація такого підходу забезпечує зменшення локальних пікових напружень і підвищення втомної довговічності вузла.

Ключові слова: двовальний шредер, ніж, вал, зварне з'єднання, багатошаровий зварний шов, концентратор напружень, втомна міцність.

Sviatoslav Fyk

**OPTIMIZATION OF MULTILAYER WELD SHAPE IN THE JOINT OF CUTTING
KNIVES AND SHAFTS OF A TWIN-SHAFT SHREDDER TO REDUCE STRESS
CONCENTRATORS**

Abstract. The stress-strain state of the joint between cutting knives and shafts of a twin-shaft shredder under peak and cyclic loads is considered. The expediency of using a welded joint instead of a bolted one is substantiated. It is shown that the most dangerous zones are located at the transition of the multilayer weld into the knife body. A rational weld profile is proposed to reduce stress concentration and improve fatigue durability of the joint.

Keywords: twin-shaft shredder, knife, shaft, welded joint, multilayer weld, stress concentration, fatigue strength.

Надійність і довговічність вузлів двовальних шредерів значною мірою визначаються працездатністю з'єднання ножів з валами. Саме цей вузол сприймає основні силові навантаження в процесі руйнування матеріалу, працює в умовах змінної дії крутного моменту, ударних перевантажень і періодичного реверсування. За таких умов навіть незначні конструктивні недоліки в зоні кріплення ножів можуть призводити до виникнення локальних концентраторів напружень, прискореного розвитку втомних пошкоджень і зниження загального ресурсу шредера.

Для вузлів кріплення ножів до валів застосовують як роз'ємні болтові, так і нероз'ємні зварні з'єднання. Болтове кріплення забезпечує ремонтпридатність, однак ускладнює конструкцію, потребує виконання отворів, уступів, фрезерованих поверхонь і створює додаткові зони локального ослаблення. Зварне з'єднання є простішим, жорсткішим і технологічно доцільнішим, однак його ефективність суттєво залежить від геометрії шва, розташування шарів та характеру переходу металу шва в тіло ножа. Саме тому підвищення довговічності такого вузла доцільно забезпечувати не лише вибором матеріалів і розмірів елементів, а передусім оптимізацією форми багатошарового зварного шва.

Метою роботи є обґрунтування раціональної форми багатошарових зварних швів у вузлі кріплення ножів до валів двовального шредера для зменшення концентраторів напружень у тілі ножа та підвищення втомної довговічності конструкції.

Аналіз силового навантаження вузла показує, що в процесі роботи шредера виникають значні змінні зусилля. Максимальні значення сили різання на ножі досягають 310–330 кН, тоді як середнє значення амплітуди сили становить близько 70 кН. Для оцінювання статичної міцності вузла доцільно приймати максимальне навантаження 310 кН, що відповідає крутному моменту на валу близько 100 кН·м, а для оцінки втомної міцності — момент близько 23 кН·м. Такі навантаження зумовлюють необхідність мінімізації всіх локальних геометричних концентраторів у зоні кріплення ножа до вала.

Порівняння зварного і болтового варіантів показує, що зварна конструкція має вищу жорсткість. Для зварного з'єднання переміщення вільної крайки ножа становить близько 1 мм, тоді як для болтового — до 2 мм. Це свідчить про меншу податливість вузла та сприятливіший розподіл навантаження у випадку нероз'ємного кріплення. Водночас результати чисельного аналізу показують, що для зварного варіанта найбільш небезпечними є не загальні переміщення, а локальні еквівалентні напруження в зоні переходу шва до ножа. При короткочасному перевантаженні напруження понад 500 МПа локалізуються на різучій крайці та поблизу границі зварного шва з тілом ножа. Саме ця зона є найімовірнішим осередком зародження втомних тріщин.

Такий характер напруженого стану свідчить, що просте збільшення катета шва не гарантує підвищення довговічності. Навпаки, надмірне локальне підсилення може сформувати додатковий концентратор напружень через різкий геометричний перехід між поверхнею ножа та зовнішнім контуром шва. За наявності підрізів, опуклого профілю або нерівномірного накладання валиків силовий потік у перерізі розподіляється нерівномірно, а в приповерхневих об'ємах металу виникають локальні піки напружень.

Для зменшення концентрації напружень у вузлі запропоновано формувати шов як багатошарову систему з послідовним нарощуванням перерізу. Перший шар повинен забезпечувати надійне сплавлення елементів і стабільну передачу навантаження в кореневій частині. Наступні шари доцільно накладати так, щоб вони не просто збільшували розмір шва, а формували плавний зовнішній контур із поступовим переходом до тіла ножа. З конструктивної точки зору найбільш раціональним є профіль з великим радіусом переходу, мінімальним підсиленням верхнього шару та зміщенням суміжних валиків відносно один одного. Така геометрія забезпечує поступове перетікання силового потоку від ножа до вала та знижує градієнт еквівалентних напружень у зоні сплавлення.

Особливо важливо уникати трьох факторів. Першим є різкий перехід від поверхні ножа до шва. Другим — надмірна опуклість зовнішнього шару. Третім — несиметричне накладання валиків, яке може призводити до додаткових залишкових деформацій після охолодження. Натомість симетричне формування шарів і плавне профілювання контуру дають змогу зменшити локальні напруження як у металі шва, так і в прилеглій зоні ножа. Це особливо актуально для деталей, що працюють у режимі циклічного навантаження, де визначальним є не лише рівень максимального напруження, а й інтенсивність його зміни на малих ділянках перерізу.

З технологічної точки зору оптимізація форми багатошарового шва є раціональнішою, ніж ускладнення всієї конструкції вузла. Вона не потребує принципової зміни схеми кріплення ножа, але дозволяє суттєво поліпшити умови роботи з'єднання. Крім того, плавний профіль шва зменшує ймовірність виникнення

дефектів, пов'язаних із локальним перегрівом, нерівномірною усадкою чи концентрацією залишкових напружень. Таким чином, багатошаровий шов повинен розглядатися не лише як технологічний елемент з'єднання, а як повноцінний конструктивний засіб керування напруженим станом вузла.

Отже, для вузла кріплення ножів до валів двовального шредера нероз'ємне зварне з'єднання є більш раціональним, ніж болтове, з точки зору жорсткості, конструктивної простоти та довговічності. Найбільш небезпечними залишаються ділянки переходу багатошарового шва в тіло ножа, де формуються концентратори напружень. Зменшити їх вплив можна шляхом оптимізації форми шва, яка передбачає плавний радіусний перехід, мінімізацію підсилення і раціональне взаємне розташування шарів. Такий підхід дає змогу підвищити втомну довговічність вузла без істотного ускладнення конструкції та технології його виготовлення.

Перелік посилань

1. Ступницький В. В., Проданчук О. О. Вплив технологічних чинників та геометрії різального інструменту на оброблюваність хромонікелевих сталей і сплавів на їх основі // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2024. Вип. 58. С. 59–77.
2. Stupnytskyy V., Prodanchuk O. Analysis of thermodynamic, stress-strain, and loaded states of chromium-nickel alloy workpieces using machining process simulation in advantage software // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2024. Vol. 10, No. 1. P. 45–62.