

A vibrációs feszültségmentesítés hatásmechanizmusának áttekintése, kihívásai és jövőbeli kutatási irányai

An overview of the mechanism, challenges, and future research directions of vibratory stress relief

Szabó Valentin Endre ⁰⁰⁰⁹⁻⁰⁰⁰⁶⁻²⁹⁷⁰⁻⁹⁹⁰⁴*

Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.016>

Kulcsszavak:

VSR
Vibrációs feszültségmentesítés
Rezgéses feszültségmentesítés
Frekvencia
Amplitúdó

Keywords:

VSR
Vibration stress relief
Model
Frequency
Amplitude

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. november 26.
Átdolgozva 2026. március 4.
Elfogadva 2026. március 10.

Összefoglalás

A kutatás célja egy átfogó tanulmány készítése volt, amely kritikusan elemzi a vibrációs feszültségmentesítés (VSR) területén elért eredményeket. A VSR technológia hatásmechanizmusát napjainkban igazolták egy új megközelítésű szimulációs modellel, így újra kell értékelni a korábbi eredményeket. A vibrációs gerjesztés kombinálása a molekuladinamikai szimulációval bebizonyította, hogy vas alapú anyagoknál a diszlokációk sokszorozódása és mozgása a feszültségváltozás fő oka. A rezgés hatására mikroplasztikus deformációk jönnek létre, amelyek elősegítik a rácsban tárolt rugalmas energia felszabadulását, mozgásba hozzák a diszlokációkat, amelyek átrendeződnek így a belső feszültség homogénebbé válik (fellazul a szemcseszerkezet). A frekvencia és amplitúdó folyamatparamétereket úgy kell kombinálni, hogy lehető legnagyobb (biztonságos) dinamikus feszültséget eredményezzenek, rezonancia frekvencián (rezonáns) és nemrezonáns esetben is.

Abstract

The aim of the research was to prepare a comprehensive study that critically analyzes the results achieved in the field of vibration stress relief (VSR). The mechanism of action of VSR technology has now been verified using a new simulation model, so previous results need to be reevaluated. The combination of vibration excitation and molecular dynamics simulation has shown that the proliferation and movement of dislocations is the main cause of stress change in iron-based materials. Vibration causes microplastic deformations, which promote the release of elastic energy stored in the lattice and set the dislocations in motion, causing them to rearrange themselves and thus making the internal stress more homogeneous (loosening the grain structure). The frequency and amplitude process parameters must be combined in such a way as to result in the highest possible (safe) dynamic stress, both at resonance frequency (resonant) and in non-resonant cases.

* Kapcsolattartó szerző. Email: szabo.valentin@nje.hu

1. Bevezetés

A gyártási folyamatok során keletkező reziduális (belső maradó) feszültségek az alkatrészgyártás minden területén problémát jelentenek. Ezek a belső feszültségek torzulást és méretbeli pontatlanságot okozhatnak, csökkenthetik a szerkezeti elemek élettartamát, valamint hozzájárulhatnak repedések vagy korrózió kialakulásához [1]. Köztudott, hogy a maradó feszültségek kialakulása elsősorban az anyag kristályrácsának torzulásából ered, amelynek fő okozói a diszlokációk, azaz a fémrácsban lévő atomi rendellenességek. Rezgő vagy váltakozó terhelés hatására az anyagban felhalmozódott diszlokációs csoportok "felnyílhatnak", mozgásba lendülhetnek, ami a belső feszültségek csökkenését eredményezi [1-2]. Ebben az áttekintő tanulmányban új megvilágításba kerülnek a korábbi tudományos eredmények, köszönhetően a közelmúltban megjelent új tudományos megközelítéseknek. A valós mérnöki életben az anyagok polikristályos jellegűek, tehát kiindulási állapotukban már tartalmaznak diszlokációkat és rácshibákat, így rendelkeznek kezdeti diszlokáció sűrűséggel. Polikristályos anyagoknál a diszlokációk mozgása, átrendeződése, falakba rendeződése és akár sokszorozódása együttesen járul hozzá a feszültség relaxációjához. Ezért a diszlokáció sűrűségének változását mindig konfigurációjában érdemes értelmezni. A tudományos életben a kutatók egykristályos molekula modelleket dolgoznak ki és ennek vizsgálata mentén vonnak le következtetéseket a polikristályos rendszerekre vonatkozóan [18]. Az egykristályos rendszerek a nulladik időpillanatban még nem tartalmaznak diszlokációkat, de a képlékenyalakítási szimulációs folyamat során a diszlokációk megjelennek és a viselkedésük megfigyelhető. A rugalmasan torzult rács feszültség mezőjét a diszlokációk kialakulása (sűrűségük növekedése) csökkenti. Polikristályos anyagokban azonban, kiinduló állapotban is vannak diszlokációk. Ilyenkor a kutatások szerint a diszlokációk átrendeződése (mozgása) és sokszorozódása kezdetektől fogva együtt zajlik, és ezek összességben eredményezik a feszültségek csökkenését.

A maradó feszültségek csökkentésére hagyományosan a hőkezeléses feszültségcsökkentést alkalmazzák, amelynek során a fémet felmelegítik, ezáltal a folyáshatára csökken, így a belső feszültségek nagy része plasztikus alakváltozással relaxálódik. A hőkezelés azonban drága (sok energiát és költséges berendezést igényel), időigényes, és oxidációt, valamint a mechanikai tulajdonságok nemkívánatos változásait okozhatja. Ezzel szemben a rezgéses feszültségcsökkentés (Vibration stress relief - VSR) mechanikus rezgésekkel csökkenti a maradó feszültségeket. Igaz, korábban több kutatás is kritikusan értékelte az eredményeket, vagy egyenesen arra jutott, hogy a módszer nem működik [2-3]. Hagyományosan a VSR eljárás során egy excenteres rezgőmotor gerjeszti az alkatrészt, azonban napjainkban többféle megoldás is létezik. A VSR energia- és költséghatékony, nagy szerkezeteken is könnyen alkalmazható, és elkerüli a hőkezelés okozta torzulást vagy szemcseszerkezeti változásokat. A rezgéses folyamat lényege, hogy ciklikus terheléssel mikroszkopikus deformációkat indukál az anyagban, ezáltal csökkentve vagy kiegyenlítve a belső feszültségeket. A VSR-t számos iparágban alkalmazzák (pl. hegesztett szerkezetek, nagy forgó tengelyek és gépsorok feszültségcsökkentésére), részben rövid kezelési ideje (általában kevesebb, mint 0,5 óra) és kedvező költségei miatt.

A módszer működési hatásmechanizmusa hosszú ideig nem volt teljesen ismert. Évtizedek óta folyik a vita a szakirodalomban arról, hogy pontosan hogyan csökkenti a rezgés a feszültségeket, milyen paraméterek szükségesek a leghatékonyabb eredmények eléréséhez, és vannak-e korlátai (pl. anyagfüggőség, fáradási terhelés okozta lehetséges károsodás). E tanulmány célja, hogy áttekintse a rezgéses feszültségcsökkentés kutatásának állását a kezdetektől egészen napjainkig. Megvizsgáljuk a módszer fejlődését és a különböző tanulmányok eredményeit, kiemelve az összefüggéseket és ellentmondásokat. Bemutatjuk a VSR működési mechanizmusára vonatkozó elméleteket, a rezgésparaméterek (frekvencia, amplitúdó, gyorsulás) hatását a stresszcsökkentés mértékére. Megvitatjuk továbbá a VSR különböző anyagokra való alkalmazhatóságát, a tanulmányok módszertani különbségeit, valamint a fennmaradó kihívásokat és a jövőbeli kutatási irányokat. Illetve bemutatjuk a legújabb fejlesztési irányokat.

2. A vibrációs feszültségmentesítés kutatásának jelenlegi helyzete

2.1. A korai kutatások eredményei és alapvető megállapítások

A vibrációs feszültségmentesítés tudományos vizsgálatai az 1980-as évek körül lendültek fel. Ekkor jelentek meg az első átfogó kutatások, amelyek alátámasztották az empirikus megfigyeléseket. Dawson és Moffat [4] kutatása úttörő volt a témában. A kísérleteik során több különböző anyagon (lágycél és alumínium ötvözetek) vizsgálták a mechanikus rezgések hatását. Sajátfrekvencia (rezonancia frekvencia) közeli frekvencián, különböző rezgésamplitúdókkal gerjesztették az előzetesen maradó feszültséggel terhelt próbatesteket, és röntgen-diffrakcióval, illetve nyúlásmérő bélyegekkel mérték a deformációt és a felületi maradó feszültségeket. Eredményeik szerint a rezgés képes csaknem teljes mértékben megszüntetni a felületi feszültségeket, amennyiben a vibráció által keltett ciklusos alakváltozás elér egy bizonyos küszöbértéket [4]. Ez a küszöb a vizsgált anyagoknál nagyjából a folyáshatárhoz tartozó 0,2%-os plasztikus nyúlás tartományában volt, a kísérletek bebizonyították, hogy a vibráció csak akkor eredményez feszültségoldást, ha a rezgéssel keltett ciklikus feszültség meghaladja az anyag lokális folyáshatárát (ennek küszöbét ~80–85%-os relatív nyúlásnál azonosították). Vagyis a kombinált (reziduális + dinamikus) feszültségnek meg kell haladnia az anyag folyáshatárát a helyi mikroplasztikus alakváltozáshoz. Az fontos megfigyelés volt, hogy a küszöb alatti amplitúdónál nem tapasztaltak feszültségcsökkenést, míg e szint felett az alkalmazott vibrációs amplitúdó növelésének a hatására lineárisan nőtt a csökkentett feszültség nagysága [4]. Fontos megállapítás volt az is, hogy a frekvencia finomhangolása a rezonancia tartományon belül nem kritikus, ugyanis a kereskedelmi forgalomban kapható VSR berendezésekkel jellemzően alkalmazott frekvencia-tartományon belüli változtatásnak alig volt hatása a végeredményre, ha a megfelelő amplitúdó elérése már megtörtént. A feszültségcsökkenés jórészt már az első az első néhány ezer rezgési ciklus alatt következett be, főként a minták felszíni rétegeiben, további rázatás után csak csekély mértékben folytatódott. Meglepő módon, ez arra utal, hogy a frekvencia változtatása nem befolyásolta lényegesen az eredményt a rezonancia frekvencia közelében, tehát a VSR hatékonyságát elsősorban az amplitúdó nagysága és a szerkezet szabad deformálódási lehetősége határozza meg a vizsgált tartományban. Továbbá az eredményekből az következik, hogy a VSR-hatás viszonylag gyorsan, a kritikus amplitúdó elérésével realizálódik, és a rezgés időtartamának növelése önmagában nem eredményez arányos többlethatást. Dawson és Moffat ugyanakkor felhívták a figyelmet egy potenciális árnyoldalra is: ha a vibráció okozta ciklikus igénybevétel megközelíti a fáradás határát, akkor a folyamat bizonyos mértékű fáradási károsodást okozhat az anyagban. Számításaik szerint azonban a teljes felületi feszültségmentesítéshez szükséges vibrációs ciklusok mindössze néhány százalékkal rövidítik meg a fáradási élettartamot, ami sok esetben elfogadható kompromisszum [4]. E korai kutatás tehát igazolta, hogy a vibrációval indukált mikroplasztikus deformációk valós alternatívát jelenthetnek a hőkezelésre, feltéve, hogy a megfelelő rezgés amplitúdót elérjük, ami megfelelően nagy deformációt eredményez. Illetve kutatásukkal, elsőként igazolták, hogy a VSR hatása nem pusztán dinamikai kiegyenlítődéssé, hanem a ciklikus képlékeny alakváltozás által kiváltott mikrostrukturális átrendeződés eredménye. Ugyanakkor rávilágított arra is, hogy szükség van a folyamat mechanizmusának alaposabb megértésére, különösen a küszöb alatti tartományban zajló esetleges feszültség-relaxáció vizsgálatára és a fáradási hatások felmérésére.

Walker és munkatársai [5] a VSR hatását kutatták mikrostrukturális szinten. Kísérleteikben egy alacsony széntartalmú acél (EN3b) próbatestet vizsgáltak. A próbatestben hideg hengerléssel hoztak létre magas kezdeti feszültségeket, majd hosszú ideig tartó, kis amplitúdójú vibrációs kezelést alkalmaztak megközelítőleg 100 Hz frekvencián [5]. Meglepő módon azt tapasztalták, hogy a rezgés amplitúdója nem érte el az anyag folyáshatárát, mégis kb. 40%-os feszültségcsökkenést eredményezett. Ez az eredmény ellentmondó a Dawson és Moffat eredményeivel [4]. Ezt röntgen-vizsgálattal is megerősítették, kimutatva a kristályszerkezetben bekövetkező változásokat. Walker és munkatársai diszlokáció-mozgási modellt dolgoztak ki magyarázatként, mely szerint már a maradó és külső dinamikus feszültség összegének a helyi diszlokációk mozgását előidéző hatása is elegendő lehet a feszültség részleges relaxációjához [5]. Az addigi „standard modell” úgy tartotta, hogy VSR-hatás csak akkor lép fel, ha a rezgés (kitérés) amplitúdója által keltett alakváltozás eléri

a 0.2%-os (folyáshatárt jelentő) maradó alakváltozást, tehát a feszültség lokálisan meghaladja a folyáshatárt. De Walker és munkatársai eredménye kiegészíti az elméletet, ami szerint, az alacsonyabb amplitúdójú, tartós vibráció is okozhat diszlokációs kúszást vagy átrendeződést, amely fokozatos feszültség-leépülést eredményez az anyagban [5]. Ezt a modellt kísérletileg is alátámasztották, ugyanis röntgendiffrakciós vizsgálatokkal diszlokációsűrűség növekedését mérték az alacsony amplitúdós vibráció hatására. Walker és munkatársainak a munkája tehát fontos kijelentést tartalmazott, ami szerint, diszlokáció-szintű mikroszerkezeti folyamatok is közrejátszanak a feszültség relaxációjában. Ez a felismerés új lendületet adott a mechanizmus további kutatásának, és rámutatott, hogy a VSR alkalmazása során nem mindig a maximális amplitúdó alkalmazása a megfelelő, bizonyos esetekben a hosszabb idejű, mérsékelt vibráció is hatásos lehet a feszültségek csökkentésére [5].

A két alapvető tanulmány eltérő megállapításai jól tükrözik a VSR működésének kétféle megközelítését. Dawson és Moffat a vibráció hatását a makroszkopikus plasztikus deformációval hozta összefüggésbe (csak a folyáshatárt meghaladó terhelés hatékony) [4], míg Walker és munkatársai a mikroszkopikus diszlokációs mozgásokra helyezték a hangsúlyt (már a folyáshatár alatti rezgés is elegendő a stresszoldáshoz) [5]. Ezek az eredmények alapozták meg a későbbi kutatásokat, amelyek arra irányultak, hogy kvantitatív modellekkel és új mérési módszerekkel pontosítsák a vibrációs feszültségmentesítés feltételeit és mechanizmusát.

2.2. Alkalmazott kutatások és modellezés

A 2000-es években a vibrációs feszültségmentesítés kutatásának fókuszja az ipari alkalmazások felé tolódott. Kiemelten nagy méretű gépelemeket és hegesztett szerkezeteket vizsgáltak. Ezzel párhuzamosan megjelentek a számítógépes szimulációk és analitikus modellek, amelyek a folyamat kvantitatív értékelését célozták.

Sun és munkatársai egy 2004-es tanulmányukban gyakorlati jelentőségű kutatást végeztek [6]. Nagy méretű hajócsavar tengelyt kezeltek vibrációs energiával. A tengely anyaga 35# jelű szénacél rúd, amely a Kínai Népköztársaság GB 699-88 nemzeti szabványa, amely megfelel a 060A35, B.S. szabványnak [6]. A tengelyt a hagyományos hőkezelés helyett vibrációs feszültségmentesítéssel kezelték, miközben nyúlásmérő bélyegekkel figyelték a tengely mentén kialakuló dinamikus feszültségek hatását és röntgendiffrakcióval mérték a maradó feszültséget a kezelés előtt és után. A vibrációs kezelés során a gerjesztő frekvenciáját a tengely sajátfrekvenciájához hangolták, ezt rezonancia frekvenciának nevezik. Ezzel maximális lengés érhető el. Ennek eredményeként a szerzők jelentős, mintegy 48%-os csökkenést mértek a makroszkopikus maradó feszültségben a kezelés után. Fontos, hogy a tengely húzószilárdsági jellemzői csak elenyésző mértékben változtak, tehát a vibráció nem rontotta jelentősen az anyag mechanikai tulajdonságait. A kísérlet megerősítette, hogy a rezonancián végzett vibráció hatékonyan képes a nagy tömegű, „előfeszített” acélszerkezetek feszültségeit mérsékelni. Sun és munkatársai bevezették a „kettős dinamikus mechanizmus” fogalmát magyarázatul, utalva arra, hogy a vibrációs feszültségcsökkentés során a reziduális és a vibrációs (dinamikus) feszültségter összeadódása idéz elő helyi folyást, ami a feszültségek relaxációjához vezet [6]. Ez tulajdonképpen összhangban van a korábbi modellekkel, de hangsúlyozza, hogy rezonancia esetén a munkadarabban kialakuló állóhullámú rezgés magas lokális dinamikus igénybevételt eredményez, amely hozzáadódik a belső feszültségekhez, és így idéz elő plasztikus alakváltozást, amely hatására a belső feszültség relaxálódik [6]. Érdemes megjegyezni, hogy a szerzők Kínában korábban közölt tapasztalatokra hivatkoznak, melyek szerint öntvényeknél a VSR-rel gyakran csak ~20%-os feszültségcsökkenést értek el, és inkább a csúcspeszültségek mérséklődtek, míg az alapfeszültség-szint alig változott [6] [7]. A saját kísérletükben azonban optimalizált rezonanciagerjesztéssel sikerült jóval nagyobb mértékű csökkenést elérni, ami arra utal, hogy a megfelelő rezgési mód és szabad deformálódási feltételek (az alkatrész rögzítésének módja) kritikusak a hatékonyság szempontjából [6].

Ugyancsak ebben az időszakban jelent meg Rao és munkatársai tanulmánya, [8] amely a VSR hatékonyságának kvantitatív kiértékelésére koncentrált hegesztett anyagokban. Egy rozsdamentes acél (304L) hegesztett próbatesten vizsgálták, hogyan csökken a maradó feszültség a vibráció hatására, és különböző mérési, illetve modellezési módszereket használtak. Kiemelték, hogy a VSR-

ipari alkalmazásában problémát jelent a hatás objektív mérése: a gyakorlatban sokszor csak a rezonanciafrekvencia eltolódását figyelik meg kezelés előtt és után, ami azonban csak kvalitatív jelzés a változásáról [8]. Rao és munkatársai ehelyett a lyukfúrásos módszerrel nyúlásmérő bélyegekkkel mért feszültségadatokból dolgoztak és megfigyelték, hogy a vibráció során a hegesztett próbatest anyagában ciklikus kúszás megy végbe. E folyamat leírására egy matematikai modellt javasoltak, amely a dinamikus feszültség által kiváltott maradó feszültség relaxációt írja le [8]. A modellt a HT-7U fúziós berendezés (Tokamak) hegesztett komponenseinek gyártása során gyűjtött adatokkal validálták, és azt találták, hogy a modell által becsült és a mért feszültségcsökkenés ~11% pontossággal egyezett. A VSR-kezelést 47,83 Hz és 60,68 Hz rezonanciafrekvenciákon végezték, 15 perces időtartamig, elektromágneses gerjesztéssel és gumialátámasztáson. Ez azt mutatja, hogy a rezgés közbeni dinamikus igénybevétel ismeretében előre jelezhető a várható feszültségcsökkenés, ami nagy segítség lehet a folyamat ipari kontrollálásában. A szerzők konklúziója szerint a VSR hatásfoka jó közelítéssel előre jelezhető a rezgés közben mért ciklikus feszültség alapján, az általuk kidolgozott képlet felhasználásával. Ez a munka hozzájárult ahhoz, hogy a vibrációs feszültségmentesítés hatását tudományosan, mérnöki módszerekkel lehessen tervezni és ellenőrizni. [8]

Zhao és munkatársai átfogó kutatást és modellezést végeztek a 2008-as kutatásukban [9]. A számítógépes szimuláció eszközével (FEM) vizsgálták a VSR hatásmechanizmusát, külön kitérve a frekvencia és amplitúdó szerepére. Véges elemes modellt készítettek egy 7075 alumíniumötvözetű, hegesztett lemez maradó feszültségeinek keletkezésére és vibráció alatti alakulására. A szimulációk két esetet hasonlítottak össze: nem rezonáns vibrációt (pl. 25 Hz-en, ami távol esik a sajátfrekvenciától) és rezonanciaközeli vibrációt. Az eredmények rámutattak, hogy nem rezonáns gerjesztésnél a feszültségcsökkenés fő meghatározója a vibrációs amplitúdó, tehát minél nagyobb a kényszerrezgés amplitúdója, annál több feszültség relaxálódik (feltéve, hogy elér egy küszöböt). Ezzel szemben rezonanciánál maga a frekvencia megválasztása a kritikus – a legjobb eredmény akkor adódik, ha a gerjesztés frekvenciája közel van a szerkezet sajátfrekvenciájához, mert ilyenkor kis bemenő amplitúdó is elegendő a nagy rezonáns lengések kiváltásához. Összefoglalva: rezonancia frekvencián a rendszer önfelerősíti a rezgést, így kis gerjesztéssel is nagy dinamikus feszültség érhető el, míg attól távol jelentősen nagyobb kényszer-amplitúdóra van szükség ugyanolyan hatás eléréséhez [9]. A Zhao-féle szimuláció továbbá egybevágott Dawson empirikus megfigyelésével abban, hogy a rezgésidő növelése bizonyos ponton túl már nem vezet további feszültségcsökkenéshez, a modell szerint a maradó feszültség túlnyomó része már néhány rezgésciklus után leépül, további ciklusokkal csak minimális pluszcsökkenés érhető el [4] [9]. Rezonáns VSR esetén a szerkezet első sajátfrekvenciáját ~79 Hz-nek találták, és ezen a frekvencián már egy egészen kicsi (10 N) gerjesztő erő is drasztikusan megnövelte az amplitúdót: néhány ciklus után 1,46 mm-ről 9,87 mm-re nőtt a kitérés. Ezzel szemben jóval a rezonancia alatt (25 Hz-en) az alakváltozás amplitúdója alig változott, rezgésenergiát elnyelte a csillapítás. Megfigyelték továbbá, hogy rezonanciánál a nagy amplitúdójú deformáció periodikusan ingadozott a szerkezeti csillapítás miatt, és 100 N erőhatásnál már ~41 mm kitérést értek el, ami után további ciklusok nem növelték a relaxációt. A szerzők kiemelték még, hogy nagyobb vibrációs amplitúdó esetén hatékonyabb a kezelés (ez összhangban van a korábbi eredményekkel), viszont a vibrációs időtartam növelése, egy ponton túl aránytalanul kis hatást generál. Összességében Zhao és munkatársainak munkája numerikus úton igazolta a VSR legfontosabb paraméterfüggéseit. A frekvencia elsősorban a rezonancia jellegén keresztül fontos, rezonancia közeli frekvencián jelentősen kisebb amplitúdóval is sikeres lehet a kezelés, míg rezonancia frekvenciától távol is használható a VSR, de ott az amplitúdó nagysága a kritikus tényező a feszültségcsökkentésben [9]. Ez a kijelentés és a szimulációval is igazolt eredmény fontos kiegészítése a korábbi tanulmányoknak.

Yang és munkatársai 2009-es kutatásukban szintén a számítógépes modellezéssel vizsgálta a VSR mechanizmusát, megerősítve Zhao következtetéseit [10]. Végeselemes FEM modellt készített hegesztett alumínium lemezekre. Nem rezonáns (25 Hz) és rezonáns (~76 Hz) gerjesztést hasonlított össze. Megállapítása szerint a nem rezonáns esetben a maradó feszültség csökkenése szinte teljes egészében az első néhány ciklus alatt bekövetkezik, a további vibrációs kezelés kis mértékű javulást eredményez ezen felül. Rezonáns gerjesztésnél kimutatta, hogy a sajátfrekvencia közelében a vibráció rendkívül hatékony. Mind rezonáns, mind nem rezonáns esetben csökkent a

maradó feszültség, de rezonanciánál jóval kisebb energia is elég, míg nem rezonáns esetenél jóval nagyobb amplitúdó kell a pozitív eredményhez, ami nagy munkadarabok esetén sok esetben nehéz feladat [10]. Yang egy konkrét ipari példát is bemutatott, egy hegesztett tengelyen a modell igazolta, hogy a VSR kezelés után jelentős feszültségcsökkenés következett be, valamint a tengelyen fáradási élettartam javulását figyelte meg. A fáradási élettartam javulás a korábbi kutatásokkal némiképpen ellentétes megfigyelés, de Yang ezt a hegesztett szerkezetben bekövetkezett feszültségcsökkenésnek tulajdonította, amely így, ekkora mértékben egy fontosabb tényezőnek bizonyult [10]. A kutatás végkövetkeztetése, hogy a VSR hatásmechanizmusa a képlékeny zónákban létrejövő ciklikus deformációnak köszönhető, és a rezonanciafrekvencián már kis gerjesztéssel is hatékony feszültségcsökkenés érhető el. A kifejlesztett FEM-modell alkalmas a rezgés paramétereinek optimalizálására (frekvencia, amplitúdó, időtartam), tudományos alapot adva a VSR további ipari alkalmazásához [10].

A 2004 és 2010 közötti időszakban a VSR technológiával kapcsolatban a világban összegyűlt annyi tapasztalat, amelyeket felhasználva több modellező kutatás is készült. Ezen kutatások eredményeiben közös az az eredmény, miszerint nem rezonáns frekvencián is lehetséges a feszültségmentesítés, de akkor a rezgési amplitúdó a nagyobb hatású paraméter. Míg rezonancia frekvenciához közel, a frekvencia nagyhatású paraméter. Ez az energiahatékonyság és a biztonság szempontjából is fontos változó. Valamennyi szerző egybehangzóan találta, hogy a feszültségoldás a ciklikus mikroplaszticitás eredménye, és már néhány rezgési ciklus alatt lezajlik a fő relaxáció. [6][8][9][10]

2.3. A vibrációs feszültségmentesítés legújabb kutatási eredményei és módszerei

A vibrációs feszültségmentesítés kutatása a 2010-es évekre új lendületet kapott, részben az addig felhalmozott ismeretek gyakorlati alkalmazása, részben a modern kísérleti eszközök és új ötletek megjelenése nyomán. Két fontos irány emelhető ki, a fáradási élettartam és a vibráció összefüggéseinek vizsgálata, gyakorlati szempontból, főként a repüléstechnikai alumíniumötvözeteknél fontos ez, másrészt kombinált módszereket és elméleteket fejlesztettek ki [1] [9-11]. Kiemelten foglalkoztak a termikus-vibrációs kezelésekkal, az ultrahangos vibráció hatásaival és a mágneses-vibrációs kezelésekkal. Ezek mellett tovább finomodott a mikroszkopikus mechanizmusokról alkotott kép is a legújabb tanulmányokban [11].

Wang és munkatársai a VSR szemcseszerkezetre gyakorolt hatását vizsgálta [11]. A kutatásuk végkövetkeztetése az volt, hogy a vibrációs stresszmentesítés hatékony módszer lehet a maradó feszültségek csökkentésére az AA 6061 alumíniumötvözetben, anélkül, hogy jelentős hőkezelést kellene alkalmazni. A kísérletek kb. 40%-os feszültségcsökkenést értek el, ami igazolja, hogy a VSR képes a belső feszültségek egy részét oldani. Emellett a vibráció mikroszerkezeti "könnyítést" idéz elő: a diszlokációsűrűség csökken, és bizonyos szemcsetextúrák fellazulnak vagy átrendeződnek, ami a feszültség relaxációjával jár együtt. Fontos megállapítás, hogy a VSR nem mindenütt egyformán hatékony: a vizsgált próbadarab belsejében (nyomófeszültségi zónában) nagyobb mértékű volt a stresszoldás, mint a húzó feszültségű külső felületeken. Továbbá bizonyos kristályorientációk (kiemelten a Cube) ellenállóbbnak bizonyultak az orientáció megváltozásával szemben, ami arra utal, hogy az anyag belső szerkezeti sajátosságai korlátozhatják a VSR teljes hatását. Összességében a tanulmány megerősíti, hogy a vibrációs stresszmentesítés részben hatékonyan csökkenti a maradó feszültségeket és javítja a méretstabilitást, miközben minimalizálja az anyag szerkezetének makroszkopikus változásait. Ezért a VSR potenciálisan hasznos, energia- és költség-hatékony kiegészítője lehet a hagyományos hőkezeléses feszültségcsökkentési eljárásoknak, különösen olyan esetekben, amikor teljes stresszmentesítés nem kritikus, vagy a hőkezelés kerülendő [11].

Gao és munkatársai egy 2018-as kutatásukban a vibrációs paraméterek és a fáradási határ közötti összefüggéseket tanulmányozták [12]. A tanulmányban repülőgép ipari alkatrészeket vizsgáltak, amelyek anyaga 7075-T651 alumínium ötvözet volt. Ez az anyag gyakori a repülőgépiparban a nagy szilárdsága és kis tömege miatt, ugyanakkor érzékeny a maradó feszültségekre, amelyek a fáradásos repedések növekedését okozzák. Gao-ék különféle rezgésamplitúdókkal (0,01–0,1 mm) végeztek VSR-kezelést előzetesen húzott (feszültséggel terhelt) standard próbatesteken, majd mérték a maradó feszültségeket és fáradástvizsgálatokat is végeztek. Az eredmények alapján egy optimális amplitúdó tartományt figyeltek meg. A kis

amplitúdójú vibráció (0,01–0,04 mm) 10 percen át jelentős mértékben (szinte teljesen) leépítette a maradó feszültségeket, míg a nagyobb amplitúdók (0,05–0,1 mm) már nem eredményeztek további feszültségcsökkenést. Sőt, a túl nagy amplitúdójú rezgés kedvezőtlen hatást gyakorolt a fáradási élettartamra. A kis amplitúdó (0,01 mm alatti) számottevően nem befolyásolta a kifáradási élettartamot. A közepes amplitúdójú kezelések (0,04 mm körül) mintegy 11%-kal növelték a fáradási határértéket. A nagy amplitúdójú kezelések (0,05 – 0,1 mm) esetén romlott a fáradási élettartam. A 0,1 mm-es amplitúdónál a fáradási élettartam ugyanennyivel, ~11%-kal csökkent a kezeletlen állapothoz képest, ezt foglalja össze az 1. táblázat.

1. Táblázat. Az amplitúdó és a fáradási határ kapcsolata alumínium alkatrész esetén

VSR amplitúdó (mm)	Fáradási határváltozás (%)
0,01	0,00
0,02	+3,70
0,03	+7,41
0,04	+11,11
0,05	-2,22
0,10	-11,11

A jelenség háttérében Gao-ék szerint az áll, hogy a magas dinamikus feszültségű vibráció mikroméretű repedéseket indíthat el az anyagban a feszültségkoncentrációk helyén. Elektronmikroszkópos vizsgálatokkal kimutatták, hogy a nagy amplitúdójú rezgés hatására valóban keletkeznek apró repedések a kritikus pontokon, ami a fáradási repedésnövekedést felgyorsítja. Ezzel szemben az alacsony amplitúdójú VSR elegendő mikroplasztikus alakváltozást okoz a feszültségcsökkentéshez anélkül, hogy károsítaná a mikroszerkezetet. Gao és munkatársai javaslata tehát az, hogy érzékeny (pl. repüléstechnikai) alumínium ötvözeteknél a kis amplitúdójú, kontrollált vibrációs kezelés alkalmazandó, mivel ez hatékonyan csökkenti a maradó feszültséget és még javítja is a fáradási élettartamot, míg a túl erőteljes vibráció kontraproduktív lehet [12]. Gao és munkatársai eredménye finomította a korábbi "minél nagyobb amplitúdó, annál jobb" elvet, és rávilágított a paraméteroptimalizálás fontosságára.

Gong és munkatársai a kutatásukban a VSR és az alakstabilitás kapcsolatát vizsgálták vékonyfalú 7075 alumíniumötvözetű alkatrészekon [13]. Az ilyen repülőgépipari szerkezeti elemek (pl. 7075 alumínium keretek) gyártása során a hőkezelés és forgácsolás hatására jelentős belső feszültségek keletkeznek, amelyek alakhibákat, deformációt okozhatnak. A kísérletekhez egy 7075 alumíniumötvözet lemezből kivágott öt azonos próbadarabot használtak, melyeket oldó (tehát edzésnek) hőkezelésnek vetettek alá (475 °C, 7 óra, majd 20 °C-os vízben kioltva) a jelentős maradó feszültségek előidézése érdekében, majd kiforgácsolták az alkatrészek közepét. A mintadarabok lapjait előzetesen síkra marták, majd mind az ötöt vékony falú (oldalfal és talpvastagság ~5 mm) keretszerkezetű alkatrészre munkálták. Ezután négy mintán különböző időtartamú VSR kezelést végeztek (10, 15, 20, illetve 30 percig tartó rezgetés), míg az ötödik minta nem kapott vibrációs kezelést, így kontrollként szolgált. A vibrációs feszültségmentesítést rezonanciára hangolva hajtották végre – egy számítással meghatározott harmadik sajátfrekvencián (~40 Hz) keltettek rezgést –, hogy a lehető legkisebb gerjesztő energiával a legerősebb feszültségcsökkentő hatást éri el. A VSR után minden mintát szobahőmérsékleten természetes öregedésnek tettek ki, és mértek rajtuk alakváltozást 3, 6, 10, 15 és 30 nap elteltével. Az alkatrészek deformációját precíziós koordináta-mérőgéppel (CMM), a felületi maradó feszültségeket pedig röntgendiffrakcióval (XRD) mérték minden egyes folyamatlépés után. Az eredményeik alapján a vibrációs kezelés utáni minden mintánál csökkent az alakváltozás mértéke a pusztán megmunkált állapothoz képest (a deformáció 0,011–0,041 mm-rel mérséklődött a VSR 10–30 perces tartományában). A rezgetés időtartamának növelésével 15–20 percig jelentősen javult a határfok: ebben az intervallumban érhető el a legnagyobb alakstabilizáló hatás, szemben a rövidebb (10 perces) vagy hosszabb (30 perces) vibrációval. VSR kezelés hiányában a kontroll darabon, a természetes öregedés során lényegesen nagyobb utólagos deformáció lépett fel, mint vibrációsan kezelt daraboknál. A 30 nap után a kezeletlen minta relatív alakváltozása ~28‰ (≈2,8%) volt, míg a ~15–20 perces VSR-rel kezelt

mintáké csak $\sim 5\%$ ($\approx 0,5\%$). Ez igazolja, hogy a vibrációs kezelés nagymértékben fokozza az alkatrészek alak- és mérettartó stabilitását a későbbi használat során. A VSR kezelés kismértékben csökkentette a próbadarabok felületi maradó feszültségeit is, és a rezgés időtartamának növelésével egyre egyenletesebb feszültségeloszlást eredményezett. Ez azt mutatja, hogy a vibrációs stresszmentesítés elősegíti a belső feszültségek csökkenését és homogenizálását a vékony falú munkadarabokban. Gong és munkatársai eredménye alapján, a VSR felgyorsítja a belső feszültségek átrendeződését és leépülését, ezáltal javítja az alkatrészek méret- és alakstabilitását. A kísérletek szerint a ~ 15 – 20 perces rezgetési idő bizonyult optimálisnak: ez jelentősen hatékonyabb volt a feszültségek oldásában, mint a rövidebb (10 perces) vagy akár hosszabb (30 perces) vibrációs kezelés. Emellett a VSR hatására a munkadarabokban a maradó feszültségek eloszlása sokkal egyenletesebbé vált, ami megerősíti, hogy a vibrációs kezelés hozzájárul a belső feszültségek homogenizálásához és ezáltal az alakstabilitás javításához. [13]

S. M. Ebrahimi és munkatársai a vibrációs feszültségmentesítés (VSR) hatékonyságát vizsgálta egy acéllapokból hegesztett tompakötés esetében [14]. A kutatás célja az volt, hogy feltárja, miként befolyásolja a vibrációs amplitúdó nagysága és a rezgési frekvencia a maradó feszültségek csökkenését, és hogyan optimalizálható a VSR paraméterezése a leghatékonyabb feszültségmentesítés érdekében. A szerzők a hegesztési maradó feszültségek kialakulását végelelemes szimulációval (FEM) modellezték, majd a kapott eredményeket lyukfúrásos nyúlásmérő módszerrel ellenőrizték, amely jó egyezést mutatott a számított értékekkel. A hegesztés során a hosszanti maradó feszültség elérte a 580 MPa-t, míg a keresztirányú feszültség maximuma 150 MPa volt. Ezután a VSR folyamatot is numerikusan modellezték az ABAQUS szoftverrel, hogy megvizsgálják, hogyan változnak ezek a feszültségek a különböző rezgési paraméterek hatására. A vizsgálatok szerint a hegesztett lemez első természetes frekvenciája 78 Hz, és a leghatékonyabb feszültségmentesítés a rezonancia közeli tartományban ($0,9$ – $1,1$ x sajátfrekvencia) érhető el. A szimulációk azt mutatták, hogy ha a rezgési frekvencia eléri a természetes frekvencia 95%-át, a hosszanti maradó feszültség több mint 80%-kal, míg a keresztirányú feszültség akár 100%-kal is csökkenhet. Amikor viszont a frekvencia túllépi a rezonanciát (pl. sajátfrekvencia $\times 1,05$ – $1,5$), a VSR hatékonysága 30–40%-kal romlik. A vibrációs amplitúdó nagysága szintén meghatározó tényezőnek bizonyult. Amikor a terhelőerő nagysága elérte a folyáshatár 20%-át ($F/F_y = 0,2$), akkor csökkentek a legjobban a maradó feszültségek, különösen a rezonanciafrekvencia közelében. A túl alacsony erő (pl. $F/F_y = 0,03$ – $0,067$) esetén a feszültségcsökkenés mindössze 10–20%-os volt. A rezgés során a lemez szabad végének kitérése akár 32,5 mm-t is elért rezonanciafrekvencián, ami összefüggésben állt a maradó feszültségek nagymértékű csökkenésével. A kutatás eredményei összességében azt mutatják, hogy a VSR hatékonysága elhanyagolható, ha a rezgési frekvencia kisebb a természetes frekvencia 50%-ánál. A legnagyobb feszültségcsökkenés ($\approx 80\%$ hosszanti és $\approx 100\%$ keresztirányú) a $0,95$ x sajátfrekvencia körüli frekvencián valósul meg. A rezonancián túli frekvenciatartományban a módszer hatékonysága jelentősen csökken. A nagyobb ciklikus erő növeli a feszültségmentesítés mértékét. A keresztirányú feszültségek csökkenése általában nagyobb mértékű volt, mint a hosszanti feszültségeké. Tehát a szerzők az optimális paramétereket a következőképpen határozták meg: a frekvencia értékének a természetes frekvencia közelébe kell esni ($0,9$ – 1 x sajátfrekvencia), az optimális vibrációs erő pedig legalább a folyáshatár 15–20%-a. A tanulmány alátámasztja, hogy a VSR hatékony és gazdaságos alternatíva a hőkezeléses feszültségmentesítéssel szemben, de kiemeli a paraméteroptyimalizálás fontosságát. [14]

H. Gao és munkatársai a vibrációs feszültségmentesítés (VSR), a termikus feszültségmentesítés (TSR) hasonlították össze a termikus-vibrációs feszültségmentesítéssel (TVSR). A TVSR eljárásra koncentráltak, annak a hatékonyságát és működését vizsgálták 7075 alumíniumötvözetten, kísérleti és végelelemes (FEM) módszerekkel egyaránt [15]. A kutatás célja az volt, hogy kísérleti és numerikus módszerekkel feltárja, miként kombinálható a hő- és rezgésalapú feszültségcsökkentés a maradó feszültségek hatékonyabb mérséklése érdekében. Illetve, hogy megértse az eljárás mikroszerkezeti és diszlokációs mechanizmusait. A szerzők hét darab 7075-T6 alumínium mintát vizsgáltak három különböző kezelési módszerrel: TVSR (hő + rezgés), TSR (termikus feszültségmentesítés) és VSR (vibrációs feszültségmentesítés). Az eljárások modellezésére végelelemes (FE) szimulációkat végeztek, amelyek figyelembe vették a feszültségrelaxációt és a dinamikus rezgés hatásait. A mérésekhez lyukfúrásos eljárást, pásztázó elektronmikroszkópot (SEM) és transzmissziós elektronmikroszkópot (TEM) alkalmaztak a maradó

feszültségek és a mikroszerkezeti változások vizsgálatára. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a TVSR eljárás a leghatékonyabb a három módszer közül: a maradó feszültségcsökkenés mértéke 20,43%-kal és 38,56%-kal nagyobb volt, mint a TSR, illetve a VSR esetében. A szimulációk és a mérések jó egyezést mutattak, a maximális eltérés mindössze ± 23 MPa volt, ami megerősítette a modell pontosságát. A TVSR során a hő és rezgés kölcsönhatása miatt a feszültségek gyorsabban és egyenletesebben csökkentek, mint a külön-külön alkalmazott kezelések során. A mikroszerkezeti vizsgálatok (SEM) kimutatták, hogy a TVSR nem változtatja meg a szemcseméretet, így az eljárás alkalmazható félkész vagy végső megmunkálás előtt anélkül, hogy a méretpontosság romlana. A TEM-felvételek alapján a diszlokációsűrűség a TVSR után jelentősen nőtt, de kisebb mértékben, mint a tiszta VSR esetében. Ez arra utal, hogy a rezgés elősegíti a diszlokációk mozgását és összegabalyodását, míg a mérsékelt hőhatás segíti a relaxációt, de nem okoz szemcsenövekedést vagy ridegedést. A mechanizmus-elemzés szerint a TVSR-ben a hő és a rezgés kölcsönösen erősítik egymást. A hőhatás csökkenti a folyáshatárt és megkönnyíti a mikroplasztikus deformációt, míg a rezgés pedig gyorsítja a feszültségrelaxációt és aktiválja a diszlokációmozgást. Ez a kettős hatás teszi lehetővé, hogy a TVSR a maradó feszültségeket rövidebb idő alatt (1 óra) csökkentse, mint a hagyományos hőkezelés, de közben a hőkezeléshez hasonló homogenitást biztosítson, kevesebb energia felhasználásával. Összegzésképpen, Gao és munkatársai (2020) arra a következtetésre jutottak, hogy a termikus-vibrációs feszültségmentesítés (TVSR) egy hatékony, gyors és energiatakarékos eljárás, amely a TSR és a VSR előnyeit egyesíti. A TVSR nem változtatja meg jelentősen a szemcseméretet, ugyanakkor növeli a diszlokációsűrűséget és hatékonyan csökkenti a maradó feszültségeket, így kiválóan alkalmazható repülőgépipari és precíziós alumínium alkatrészek esetében is. Tehát Gao és munkatársai továbbfejlesztették a VSR technológiát és kombinált kezelések alkalmazását kezdték el kutatni, ami a következő évek uralkodó irányzatává vált a tématerületnek. [15]

Song és munkatársai 2021-ben új kombinált kezelést alkalmaztak [16]. A szegmentált termikus-vibrációs feszültségmentesítési eljárás (STVSR – Segmented Thermal-Vibration Stress Relief) a termikus-vibrációs feszültségmentesítés (TVSR) továbbfejlesztett változata, amelyet nagyméretű, 2219 alumíniumötvözetű gyűrűk maradó feszültségeinek csökkentésére fejlesztettek ki. Az eljárás lényege, hogy a munkadarabot szakaszosan kezelik: az egyes szegmenseket egymás után melegítik és rezgésnek teszik ki, így a folyamat nagy méretű, kis merevségű alkatrészeknél is hatékonyan alkalmazható. A kísérletek szerint az STVSR hatására a radiális irányú és tengelyirányú maradó feszültségek 44–45%-kal csökkentek, miközben a feszültségeloszlás egyenletesebbé vált. A húzószilárdság és a folyáshatár 31–67 MPa-tal, a keménység 1,4–19 HV egységgel nőtt, a nyúlás pedig legfeljebb 3,1%-kal javult. Mikroszerkezeti vizsgálatok (SEM, TEM) kimutatták, hogy a szemcseméret lényegében nem változott, ugyanakkor a diszlokációsűrűség csökkent, és nőtt az Al_2Cu (θ -fázis) kiválások mennyisége, ami az anyag szilárdságát fokozta. Az STVSR mechanizmusa a hő és rezgés szinergikus kölcsönhatásán alapul: a hő lágyítja az anyagot és elősegíti a diszlokációmozgást, míg a rezgés gyorsítja a stresszrelaxációt. Ennek eredményeként az STVSR gyors, energiatakarékos és méretstabil feszültségmentesítést biztosít, különösen alkalmas nagyméretű, precíziós alumíniumszerkezetek esetében. [16]

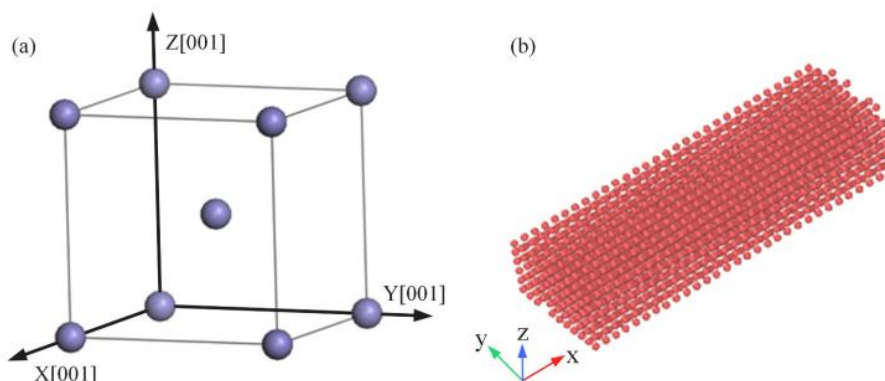
Huang és munkatársai egy új kombinált eljárást vizsgáltak [17]. A tanulmány egy új, kombinált mágneses-rezgéses feszültségmentesítési eljárást (CMVT – Combine Magnetic Vibration Treatment) mutat be. Az eljárás lényege, hogy a váltakozó mágneses tér és a mechanikai rezgés együttesen hat az anyagra. A mágneses tér a magnetostrikció révén mikroszkopikus alakváltozásokat idéz elő, míg a rezgés elősegíti a diszlokációk mozgását és kölcsönhatását, ezáltal gyorsítja a stresszrelaxációt. A kísérleti eredmények szerint a kombinált CMVT eljárás hatékonyabb, mint a hagyományos VSR kezelés önmagában. A hosszanti maradó feszültség 39,7%-kal, a keresztirányú 27,8%-kal csökkent. A mikroszerkezeti vizsgálatok kimutatták, hogy az eljárás nem változtatja meg a szemcseméretet, viszont növeli a diszlokációsűrűséget és rendezettebbé teszi a mágneses doménszerkezetet, ami a feszültségek kiegyenlítődsét eredményezi. Összességében az CMVT gyors, energiatakarékos és környezetbarát módszer, amely szobahőmérsékleten is alkalmazható, és hatékonyan csökkenti a maradó feszültségeket anélkül, hogy rontaná az anyag mikroszerkezetét vagy mechanikai tulajdonságait. [17]

Song és munkatársai 2024-es kutatásukban egy új modellt mutattak be, amely a VSR technológia mélyebb megértését teszi lehetővé [18]. A modell kidolgozásának módszere fontos

eredmény a tudományág számára. A korábbi mikro-szintű vizsgálatok főként kísérleti jellegűek voltak, egységes, átfogó tudományos magyarázat nélkül. Köztudott, hogy a maradó feszültségek kialakulása elsősorban az anyag kristályrácsának torzulásából ered, amelynek fő okozói a diszlokációk, azaz a fémrácsban lévő atomi rendellenességek. Rezgő vagy váltakozó terhelés hatására az anyagban felhalmozódott diszlokációs csoportok "felnyílhatnak", mozgásba lendülhetnek, ami a belső feszültségek csökkenését eredményezi. Song és munkatársai kutatásukban ezért arra törekedtek, hogy rendszeresen, kis időlépésenként megvizsgálják a VSR paramétereinek hatását a maradó feszültségekre, és mikroszkopikus szinten is modellezzék a folyamatot, hogy választ adjanak arra, miként csökkenti a vibrációs kezelés a maradó feszültségeket atomi szinten. Ennek érdekében egy mechanikai modellt dolgoztak ki, amely az anyag mikroszerkezetét is figyelembe veszi, továbbá molekuladinamikai szimulációkkal vizsgálták a diszlokációk, energiaváltozások, feszültség- és alakváltozás-mezők fejlődését a folyamat során. [18]

A kísérleti módszerük a gyakorlati oldalról indult. A Song és munkatársai kísérleti úton vizsgálták, hogyan hatnak a fő VSR folyamatparaméterek (a rezgés frekvenciája, amplitúdója és a gerjesztés csúcsgyorsulása) a maradó feszültség csökkenésére. Ehhez hidegen hengerelt, nem hőkezelt nagy szilárdságú acélemezeket használtak, amelyekben jelentős maradó feszültség volt jelen. A maradó feszültségeket röntgendiffrakciós módszerrel (XRD) mérték meg a kezeléseik előtt és után. A VSR kísérletekhez egy rezgő gerjesztő padot alkalmaztak, ahol a lemez egyik végét befogták, a másik végét pedig húzófeszültséggel előfeszítették (max. 10 kN erővel), miközben a lemez síkjára merőleges irányban sinuszos vibrációt keltettek. A kísérleti berendezésben a biztonság érdekében a vibrációs terhelés paramétereit a rendszer maximális kapacitásának 90%-áig engedélyezték (ennek megfelelően a csúcs-gyorsulást $\sim 441 \text{ m/s}^2$, a csúcs-sebességet $\sim 1,575 \text{ m/s}$, a csúcs-kitérést pedig $0,02295 \text{ m}$ értékben korlátozták). A vizsgálatok során először frekvenciasöpréssel meghatározták a lemez sajátrezgési frekvenciáit (a legalacsonyabb rezonancia $\sim 162 \text{ Hz}$ volt), majd egyenként tanulmányozták a három paraméter hatását úgy, hogy mindig csak egy paramétert változtattak, a másik kettőt rögzítették. Így számos kísérlet sorozatot végeztek: (1) különböző gerjesztő frekvenciákkal, adott amplitúdó vagy adott gyorsulás mellett; (2) különböző amplitúdókkal, fix frekvencia vagy fix gyorsulás mellett; (3) különböző csúcs-gyorsulással, adott frekvencia vagy amplitúdó mellett. A kezeléseik után az XRD mérésekből meghatározták a maradó feszültség csökkenésének mértékét az egyes beállításoknál, és elemezték a paraméterek hatását. [18]

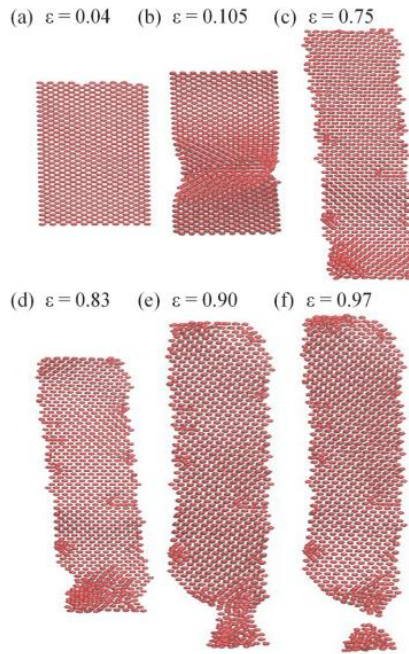
Molekuladinamikai (MD) szimulációkat végeztek a kísérleti eredmények alapján. A mikrostrukturális mechanizmus vizsgálatához a kutatók molekuladinamikai modellt építettek. Kiindulásként a vas kristályos alapcellájából indulva egy tércentrált köbös (BCC) vas egykristály modellt hoztak létre ez látható az 1. ábrán. A szimulált egykristály $\sim 86 \text{ nm} \times 29 \text{ nm} \times 14 \text{ nm}$ méretű volt (kb. 3480 atom), az anyag interakcióit beágyazási atom modell (EAM) potenciállal írták le, és a rendszer hőmérsékletét 300 K -en tartották (Berendsen-hőfürdő alkalmazásával)



1. ábra. a) Középpontos köbös rácsszerkezet (BCC) [18] b) Az egykristályos vas kezdeti modellje [18]

A modellben a kényszereket úgy határozták meg, hogy a kristály szabadon tudjon nyúlni vagy zsugorodni húzás/nyomás hatására. A LAMMPS programmal futtatott MD szimulációk során előbb

egytengelyű húzási és nyomási tesztek végeztek a modellen, majd ciklikus húzó-nyomó terhelést (rezgést) is szimuláltak. A húzó/nyomó szimulációk többszakaszosak voltak: a modellt előbb relaxálták (egyensúlyba hozták) 100 000 MD-lépésen át, majd iteratív módon kis lépésekben deformálták (például húzásnál 0,2% nyúlás ciklusonként), minden ciklus után ismét relaxációs szakaszt iktatva be, ez látható a 2. ábrán. Ezt az iterációt sokszor (pl. húzásnál 500×) megismételve egészen nagy (~100%) alakváltozásokat is elértek, miközben folyamatosan nyomon követték a modell feszültség, alakváltozás, energiaviszonyait és a diszlokációk kialakulását, mozgását.



2. ábra. A színvas anyagok húzási folyamatában fellépő különböző rugalmas alakváltozásokhoz tartozó atomhelyzetek szimulációs diagramja

A nyomó és ciklikus terheléseknél hasonló feltételeket alkalmaztak, a különbség csupán annyi volt, hogy a nyomó terhelésnél a modell mindkét végén nyomóirányú mozgást vezettek be, a ciklikus (VSR) szimulációnál pedig periodikus váltakozó erőt alkalmaztak a Z irányban. A vibrációs gerjesztéshez szinuszos időfüggésű erőt vettek fel, amelynek frekvenciáját rendkívül magasnak (1×10^{12} Hz nagyságrend, a molekuláris rezgések időskáláján) választották, hogy a makroszkopikus ciklikus terhelést leképezzék az atomi szimuláció időléptékén. Az MD szimulációk eredményeit vizualizációs szoftverrel (OVITO) és adatelemzéssel (MATLAB) értékelték. A megfigyelések középpontjában a diszlokációk kialakulása, mozgására és az atomi energia változása állt. [18]

3. Eredmények és megvitatás

Song és munkatársai által publikált átfogó kutatás eredményei alapján át kell értékelni, a VSR folyamatparaméterek hatását [18]. A fő folyamatparaméterek a rezgési frekvencia, a rezgés amplitúdó és a csúcsgyorsulás. Az idő paraméter is fontos tényező, de ennek fontossága már tudományos igényességgel tisztázott.

3.1. A fő folyamatparaméterek

Rezgésfrekvencia alapvető fontosságú. A kísérletek egyértelműen kimutatták, hogy a gerjesztés frekvenciája kulcsszerepet játszik a VSR hatékonyságában. Nem a frekvencia abszolút értéke a döntő, hanem az, hogy közel van-e a rendszer sajátrezgési (rezonancia-)frekvenciájához. Song és munkatársai fixált amplitúdó mellett azt találták, hogy minden vizsgált frekvencián csökkent a maradó feszültség az acéllemezben, de a csökkenés mértéke jelentősen eltért: a rezonanciához közeli frekvenciáknál (pl. ~73 Hz és ~130 Hz, amelyek a 162 Hz-es rezonancia alatt vannak) sokkal

nagyobb volt a feszültségcsökkenés, míg a rezonanciától távol eső frekvenciáknál gyengébb [18]. Fixált csúcs-gyorsulás mellett (azaz azonos maximális gyorsulással járó rezgések esetén) szintén hasonló trend mutatkozott: általánosságban ahogy növelték a frekvenciát, egyre kevésbé hatott a VSR (mert magasabb frekvencián ugyanazon gyorsulás kisebb kitéréssel jár, így kisebb deformációt okoz), és csak akkor tapasztaltak átmeneti javulást, ha a frekvencia ismét a sajátfrekvencia közelébe került [18]. Összességében tehát a frekvencia hatása elsősorban attól függ, hogy a gerjesztés rezonancia-közeli tartományban van-e, és nem magától a Hz értéktől. Rezonancia közeli gerjesztés esetén a rezgés nagy dinamikus feszültséget kelt az anyagban, és amikor ez a dinamikus feszültség a munkadarab kezdeti maradó feszültségével összeadódva meghaladja az anyag folyáshatárát, akkor mikropasztikus deformációk keletkeznek az anyagban, melynek révén hatékony feszültség-relaxáció indul meg. Ezzel szemben a rezonanciától távoli frekvenciák nem képesek elegendően nagy periodikus igénybevételt generálni, így jóval kisebb mértékű a feszültségcsökkenés. Fontos gyakorlati megállapítás, hogy a leghatásosabb frekvencia az, amely kissé a rezonanciafrekvencia alatt van, azaz az ún. szub-rezonancia tartományban [9] [14] [18]. Érdemes figyelembe venni azt is, hogy ahogy a rezgés hatására csökken a maradó feszültség, a szerkezet rezonanciafrekvenciája kismértékben változhat (általában csökken), ezért a gerjesztő frekvenciát dinamikusan lehet szükséges finomhangolni a kezelés során.

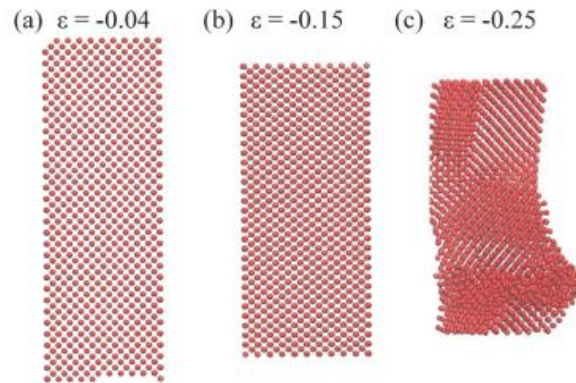
A másik fő folyamatparaméter a rezgésamplitúdó. A vibráció kitérése (amplitúdója) szintén döntő befolyással bír a VSR folyamat sikerére. A Song kutatásának az eredményei azt mutatták, hogy minél nagyobb amplitúdójú rezgést alkalmaztak, annál nagyobb mértékben csökkent a maradó feszültség a vizsgált tartományon belül. Egy adott (rezonancia-közeli, pl. 73 Hz-es) frekvencián vizsgálva: a legnagyobb (~0,5–0,6 mm nagyságrendű) amplitúdóknál érték el a legnagyobb feszültségcsökkenést, míg egészen kis (0,01–0,02 mm-es) amplitúdóknál csekélyebb volt a hatás [18]. Hasonló következtetésre jutottak akkor is, amikor fix csúcs-gyorsulás mellett változtatták az amplitúdót: noha ebben az esetben a frekvencia is változott, a mérések gondos megválasztásával kizárták a rezonancia beleesését. Így is a nagyobb kitérések egyértelműen nagyobb feszültségcsökkenést eredményeztek [18]. A jelenség magyarázata, hogy a nagyobb amplitúdójú rezgés nagyobb dinamikus igénybevételt kelt az anyag belsejében, és így a külső rezgés okozta feszültség és a belső maradó feszültség összege könnyebben haladja meg a folyáshatárt. Ilyenkor mikroszkopikus képlékeny alakváltozások lépnek fel a kristályszerkezetben, melynek során a szemcsék határain felhalmozódott belső diszlokáció-torlódások feloldódnak, ezáltal hatásosabban csökken a maradó feszültség. Összefoglalva, adott anyag esetén létezik egy amplitúdó-tartomány, amely alatt nem indul meg számottevő feszültség-leépülés, efelett viszont az amplitúdó növelése erőteljesen fokozza a VSR hatását – a kísérletekben ez utóbbi tartományban dolgozva lineárisan nőtt a feszültségmentesítés mértéke az amplitúdóval [6] [8]. Song munkája esetén ki kell emelni, hogy nagyon kis amplitúdóknál, néha anomáliák adódtak – pl. egy adott kis értéknél a maradó feszültség csökkenése nem illeszkedett a trendbe –, de ez feltehetően a minták kiinduló feszültségeloszlásának különbségéből adódott, és nem befolyásolja a fő következtetést.

Song kutatásában a harmadik vizsgált paraméter, a rezgés maximális gyorsulása (csúcs-gyorsulás) [18]. Ez önmagában, meglepő módon nem mutatott szignifikáns, közvetlen hatást a feszültségcsökkentésre az adott kísérleti tartományban. Kezdetben rögzített frekvencián vizsgálták a hatását: ilyenkor a csúcs-gyorsulás növelése együtt járt az amplitúdó növelésével is, így ebben az értelemben a nagyobb gyorsulásokkal jobb feszültségcsökkenést mértek – de ez valójában a nagyobb kitérésnek volt betudható, nem magának a gyorsulásnak. Amikor viszont fix amplitúdó mellett változtatták a gerjesztés frekvenciáját (így a gyorsulást is), az eredmények nem mutattak egyértelmű trendet: bizonyos frekvenciáknál (pl. amelyek közel estek a rezonanciához) a feszültségcsökkenés átmenetileg javult, másutt nem változott vagy kis mértékben romlott. Ez arra utal, hogy a csúcs-gyorsulás nem önálló befolyásoló tényezője a VSR-nek, csak közvetetten, a vele összefüggő frekvencia és amplitúdó által hat a folyamatra. Így a gyorsulás értékének növelése önmagában bizonyíthatóan nem javítja a maradó feszültség oldódását.

Gyakorlatilag tehát a VSR folyamat tervezésekor a frekvencia és amplitúdó optimalizálása a fő feladat; a gyorsulási szint betartása inkább a berendezés és a munkadarab épsége szempontjából lényeges, de a feszültségmentesítés mértékét nem befolyásolja közvetlenül (feltéve, hogy a gyorsulás elegendő a kívánt amplitúdó és frekvencia megvalósításához).

3.2. Mikroszerkezeti megfigyelések és molekuladinamikai (MD) szimulációk

Songék kutatásának egy nagyon nagy eredménye az MD szimuláció. Az egykristályos vas MD szimulációk eredményei jól rekonstruálták az anyag mechanikai viselkedését makroszkopikus értelemben és bepillantást engedtek a mikroszerkezeti folyamatokba is. A szimulált húzási görbe tipikusan három szakaszt mutatott: (I) kis alakváltozásoknál lineáris rugalmas deformációs szakaszt, majd (II) egy képlékeny folyási szakaszt, végül (III) a tönkremenetel (szakadási) szakaszát. A rugalmas szakaszban az atomrács szabályosan torzul, de az atomok egymáshoz viszonyított rendje rendezett marad, és nem indul meg diszlokációcsúszás. Amikor azonban a feszültség eléri az anyag folyáshatárát, hirtelen nagymennyiségű diszlokáció keletkezik és mozdul el a rácsban – ennek hatására a szükséges feszültség azonnal zuhan, megkezdődik a képlékeny alakváltozás szakasza. A húzás során a feszültség ezután egy viszonylag stabil (plató) érték körül ingadozott, fogazott alakú fluktuációkkal, ami arra utal, hogy a folyamatosan keletkező és mozgó diszlokációk időszakosan egymásnak torlódnak (felhalmozódnak) és ellenállást fejtenek ki, majd újra megindulnak, ciklikusan befolyásolva a feszültség értékét. Végül nagyon nagy nyúlásnál (a modell ~83%-os megnyúlásánál) nyakelvékonyodás lép fel, majd a kristály elszakadt. A szakadáskor a diszlokációk száma és rendezetlensége rohamosan nő. Songék kutatásában a nyomó terhelés esetén hasonló jelenségek mentek végbe azzal a különbséggel, hogy a vas egykristály nagyobb folyási szilárdságot mutatott nyomásra (a szimuláció szerint kb. 58 GPa) mint húzásra (kb. 32 GPa), azaz a kristály jobban ellenállt a nyomásnak, mielőtt megindult volna benne a diszlokációk csúszása (3. ábra).



3. ábra. A szíavas anyagok nyomási folyamatában különböző alakváltozási állapotokhoz tartozó atomhelyzetek [18]

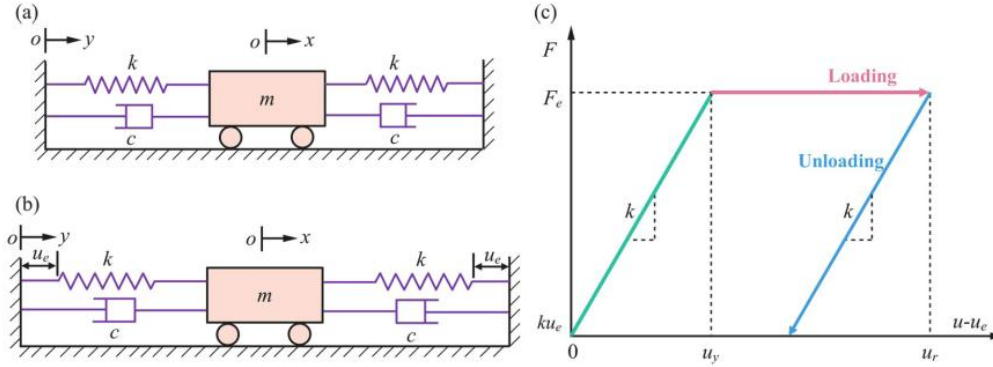
Nyomásnál is egy rugalmas lineáris szakasz után hirtelen folyási pont következett be, ahol diszlokációk indultak meg és a feszültség leesett, majd a képlékeny szakaszban egy lapos, hullámzó feszültséggörbe alakult ki (a diszlokációk nyomásnál is torlódásokat és feszültségingadozást okoztak). A húzó és nyomó szimulációk egyaránt azt igazolták, hogy a diszlokációk szaporodása és mozgása a fő oka a feszültség “meglazulásának”. A képlékeny tartományban, amikor a diszlokációk megindulnak, az anyagban tárolt rugalmas feszültség jelentős része hirtelen felszabadul, így a belső feszültség szint csökken. Ezt a jelenséget kíséri az atomi rendszerek energiaváltozása is, a szimulációk szerint a diszlokációk kialakulásakor és csúszásakor az összesített atomi potenciális energia ugrásszerűen csökken, hiszen a rugalmas torzításban tárolt energia egy része felhasználódott a diszlokációk létrehozására és mozgatására. A diszlokációk további mozgása és torlódása később, az energia újbóli emelkedését okozhatja (mivel a kölcsönható diszlokációk rendezetlenséget és helyi feszültségkoncentrációkat visznek a rendszerbe), de amikor a torlódott diszlokációk “átugranak” egy akadályon vagy kioldódnak a szemcse határán, az energia ismét lecsökken. A folyamat így a diszlokációk keletkezésének, mozgásának és megszűnésének köszönhetően dinamikus egyensúlyt hoz létre.

3.3. Ciklikus terhelés (VSR) hatása a molekuladinamikai (MD) szimulációk alapján

A MD modellel váltakozó feszültségű terhelést is szimuláltak a Songék a kutatásukban, hogy közvetlenül megfigyeljék a VSR mikroszkopikus hatását [18]. A számítások szerint a ciklikus húzó-

nyomó igénybevétel hatására a kristály belső feszültsége kezdetben folyamatosan csökkent: néhány ciklus után a feszültségcsúcsok értéke jelentősen lecsökkent, a ciklusonkénti minimális feszültség pedig gyakorlatilag elérte a nullát, vagyis a rendszer egyre "lazább" lett. Ez a megfigyelés összhangban van a kísérleti eredményekkel, ahol a vibrációs kezelés végére a maradó feszültségek közel nullára csökkentek a mérési pontokban. A szimuláció rávilágított a jelenség okára: az első néhány rezgésciklus során a vasrácsban mikroplasztikus deformáció következett be – az anyag bizonyos részein a periodikus feszültség elérte a mikro-folyáshatárt és diszlokációk keletkeztek, illetve mozdultak el – emiatt a belső rugalmas feszültség egy része azonnal felszabadult. Ahogy a ciklikus terhelés folytatódott, a diszlokációk egymáshoz torlódtak, majd néhány ciklus alatt fel is nyíltak (kioldódtak), azaz a diszlokációs kötegek elmozdultak a rácsban. Ennek hatására a belső feszültség egy új, alacsonyabb és stabilabb szinten állandósult, a feszültségcsúcsok már nem csökkentek tovább számottevően, a minimum pedig zérus közeli maradt. A gerjesztés intenzitása befolyásolta, milyen hamar és milyen mértékben állt be ez a stabilizáció: nagyobb dinamikus terhelés (excitation stress) esetén meredekebben esett a feszültség görbéje az elején, és több diszlokáció keletkezett már a korai ciklusokban, vagyis az anyag belső folyása kifejezettebb volt. Ebből az következik, hogy a VSR hatása annál nyilvánvalóbb, minél nagyobb rezgő terhelést alkalmazunk (bizonyos határig), hiszen annál hamarabb indul meg a mikroplasztikus alakváltozás az anyag belsejében. Ugyanakkor lényeges, hogy a hatás nem lineárisan nő a terheléssel a végtelenségig: az anyagon belüli diszlokációs folyamatoknak van egy saját dinamikája és korlátja. Mivel a kristályokban a diszlokációk mozgását sok tényező (szemcsehatárok, idegen atomok, kiválások stb.) gátolhatja, a mikroplasztikus folyamat eleinte csak a szemcsék egy kis részében megy végbe (lokalizált csúszások formájában), miközben a többi rész rugalmas marad. Ahhoz, hogy a teljes anyag átfogó mikroplasztikus folyásba kerüljön (és ezzel a maradó feszültségek globálisan is leépüljenek), a külső rezgő feszültségnek egy küszöbértéket meg kell haladnia. Ezt követően a diszlokációforrások tömegesen aktiválódnak, a diszlokációk mozgása nagyrészt azonos irányba rendeződik, és az anyag egészében mikro-folyásra kapcsol, ami a maradó feszültség drasztikus csökkenésével jár. Songék megfigyelték, hogy amikor ez az állapot beáll, a vibráció hatására a maradó feszültség egyenletesebben oszlik el az anyagban (nincsenek nagy csúcsfeszültségű lokalizációk), mivel a szemcsék közötti feszültségkiegyenlítés megtörténik a sok aktív diszlokáció révén. Ez a homogenizációs hatás a VSR egyik fontos előnye lehet: nemcsak csökkenti a maradó feszültségek nagyságát, de kiegyenlíti az eloszlásukat, így csökkenti a potenciális gyenge pontokat a szerkezetben. [18]

A kutatás során egy elméleti modellt is felállítottak a rezgéses feszültségcsökkentés mikromechanizmusának leírására. A modell egyetlen polikristályos szemcsét vizsgál, amelyet egy tömegpontként és a benne lévő rugalmas feszültségmezőt két rugóként képzeltek el (a rugók a szemcse belsejében tárolt elasztikus feszültséget reprezentálják, hasonlóan egy megfeszített rugó energiájához). Kiindulási állapotban (külső terhelés nélkül) a tömegpont egyensúlyi helyzetben van, a rugók nincsenek megnyújtva – ez felel meg a maradó feszültségmentes állapotnak. Ha azonban maradó feszültség halmozódik fel a szemcsében, azt a modellben úgy írják le, hogy a két rugó előfeszített állapotba kerül (a rugóállandó és a rugó megnyúlása szimulálja ezt). A vibrációs terhelést egy külső periodikus hatás szimulálja, amely a tömegre hat. A rendszer mozgásegyenlete megmutatja, hogy a belső rugókban (a szemcsében) mikor jön létre képlékeny deformáció. Amint az egyik rugó feszülése eléri a folyáshatárt és a tömegpont sebessége megfelelő irányú, a rugó megnyúlása maradó alakváltozást szenved. A modell egyenleteiből levezették, hogy a reziduális feszültség relaxációjának mértéke a két rugó maradó megnyúlásának összegével arányos. Legfontosabb következtetésük, hogy a belső feszültség felszabadulásának elengedhetetlen feltétele a mikroszkopikus képlékeny deformáció létrejötte az anyagban, ez látható a 4. ábrán. [18]



4. ábra. A maradék feszültség relaxációs modellje és az ideális rugalmas-képlékeny anyagok erő-deformációs görbéi: a) kezdeti maradék feszültség nélkül [18] b) kezdeti maradék feszültséggel [18] c) erő-deformáció görbék [18]

Song és munkatársai által kidolgozott maradék feszültség relaxációs modell dinamikán alapul [18], hogy feltárja a maradék feszültség relaxációjának mikroszkopikus mechanizmusát a VSR során. A polikristályokból álló szemcsét egy koncentrált tömegelemmel „m” egyenértékűnek tekintjük, az elasztikus feszültségmezőt pedig egy rugóelemmel, amely az elasztikus alakváltozási energia tárolására szolgál (4. ábra). Ha külső tényezők nem hatnak, „m” a kezdeti egyensúlyi helyzetben van, és a rugók mindkét végén szabadok (4. ábra (a)), ami azt az esetet ábrázolja, amikor a kezdeti maradék feszültségek még nem keletkeztek az egyenértékű szemcsé belsejében. Amikor a rendszer külső hatásoknak van kitéve, mindkét végső rugó feszültség alatt áll „ u_e ” (4. ábra (b)), ami az egyenértékű szemcsé belsejében lévő kezdeti maradék feszültséget „ $2ku_e$ ” ábrázolja. A rugó visszatérő feszültségének és alakváltozásának ideális elasztoplasztikus modellje a 4. ábra (c) mutatja, ahol „ u_r ” az egyirányú mozgás által előidézett maximális elmozdulás, amikor „m” külső gerjesztésnek van kitéve, és „c” a rendszer ekvivalens viszkózus csillapítási együtthatója. Ennek az egyfokú szabadságú rendszernek a mozgásegyenlete az elasztikus tartományban a következőképpen írható le [18]:

$$m\ddot{x} + 2c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y + u_e - u_p^+) + k(x - y - u_e - u_p^-) = 0 \quad (1)$$

Ahol, „ u_p^+ ” és „ u_p^- ” a bal és jobb rugók állandó alakváltozását jelöli. Legyen „ $a = b$ ”, akkor a fenti egyenlet a következőképpen írható le:

$$m\ddot{z} + 2c\dot{z} + k(z + u_e - u_p^+) + k(z - u_e - u_p^-) = -m\ddot{y} \quad (2)$$

A (2) egyenlet mindkét oldalát egyszerre „m” -mel osztva a következő eredményt kapjuk:

$$\ddot{z} + 4\xi\omega_n\dot{z} + \frac{\omega_n^2}{2}(z + u_e - u_p^+) + \frac{\omega_n^2}{2}(z - u_e - u_p^-) = -\ddot{y} \quad (3)$$

Ahol:

$$\omega_n = \sqrt{2k/m} \quad (4)$$

a rendszer természetes körfrekvenciája és

$$\xi = c/2m\omega_n \quad (5)$$

a rendszer csillapítási aránya. Amikor „m” külső gerjesztés hatására rezegni kezd, a bal oldali rugó deformációjához szükséges feltételei „ $z + u_e - u_p^+ > u_y$ ” és „ $z > 0$ ”. Ezen a ponton a rendszer mozgásegyenletei a következőképpen írhatók le:

$$\ddot{z} + 4\xi\omega_n\dot{z} + \frac{F_e}{m} + \frac{\omega_n^2}{2}(z - u_e - u_p^-) = -\ddot{y} \quad (6)$$

ahol „Fe” a rugó folyáshatára. A diszlokációk szaporodása, megsemmisülése és átszerveződése a VSR során időt igényel, ezért a feszültség relaxációja kvázi statikusan történik (azaz a pillanatnyi relaxációs sebesség kicsi, és nullának tekinthető). Ezért, amikor a sebesség „ $\dot{z} = 0$ ”, a bal oldali rugó nyúlási hossza „ $u_r + u_e$ ”. A bal oldali rugó maradandó alakváltozása a következőképpen írható le:

$$u_p^+ = u_r + u_e - u_y \quad (7)$$

A jobb oldali rugó rugalmasságának feltételei: „ $z - u_e - u_p^- < -u_y$ ” és „ $\dot{z} < 0$ ”. A rendszer mozgásegyenlete így írható le:

$$\ddot{z} + 4\xi\omega_n\dot{z} - \frac{F_e}{m} + \frac{\omega_n^2}{2}(z + u_e - u_p^+) = -\ddot{y} \quad (8)$$

Amikor a sebesség „ $\dot{z} = 0$ ”, a jobb oldali rugó összenyomott hossza „ $u_r - u_e$ ”. A jobb oldali rugó maradandó alakváltozása a következőképpen írható le:

$$u_p^- = u_r - u_e + u_y \quad (9)$$

A tömegelem „m” maradék feszültségének relaxációja külső terhelés hatására a bal és jobb oldalon fellépő rugóerő-csökkenés „ ku_p^+ ” és „ ku_p^- ” összegével fejezhető ki:

$$\Delta\sigma = ku_p^+ + ku_p^- \quad (10)$$

Az egyenletekből az következik, hogy amikor a szemcse (koncentrált tömegegység) külső rezgés terhelések együttes gerjesztésének van kitéve, a belső rugalmas feszültségekben (a rugó belsejében) tárolt rugalmas alakváltozási energia felszabadulásának alapvető feltétele a mikroszkopikus plasztikus alakváltozás keletkezése. Más szavakkal, az anyag belsejében lévő maradék feszültség relaxációja a mikroplasztikus deformáció folyamatos előidézésével valósul meg. Termodinamikai szempontból egy rendszer stabilizálásához az anyagban lévő energiát csökkenteni kell. Terhelésmentesítés során az anyag belső feszültségi energiáját csak úgy lehet csökkenteni, hogy csökkentjük az anyag belső feszültségi energiáját, például helyi diszlokáció csúszásával. Ez egy termodinamikailag spontán folyamat, amely nagyon lassú lehet. Ha azonban bizonyos dinamikus inger hat rá, például kis feszültség alkalmazása, az egyes rácsook dinamikus energiája megnő, az atomok rezgési frekvenciája fokozódik, és a nagy energiájú atomok kölcsönhatásba lépnek a környező atomokkal, kijavítva az egyes rácsook deformációit és torzulásait, ami az anyag diszlokációinak mozgásához és átrendeződéséhez vezet, majd mikroszkopikus plasztikus alakváltozást generál, amely folyamatos felhalmozódással bizonyos mértékben csökkentheti a maradék feszültségeket. Azonban a diszlokáció mozgását a szemcsék vagy a szemcsék közötti határok akadályozzák, és a plasztikus alakváltozás lokalizált jellegű, ezért a kisebb külső feszültségek előnyösen csak a maradék feszültségcsúcsok egy részét csökkenthetik. [18]

A szemcseméret, az eloszlás és a morfológia összetettsége, valamint a polikristályokon belüli maradék feszültség szuperpozíciós hatása miatt a valódi belső feszültség (a szuperponált feszültségmező) nem feltétlenül vezérli a diszlokáció mozgását a külső feszültségek irányában, hogy átfogó lágyító hatást eredményezzen. Csak akkor, ha a külső feszültség meghalad egy bizonyos küszöbértéket, a diszlokációs mozgás általános hatása összhangban lehet a külső terhelés irányával, így az anyag egészében mikro-folyáshatás jön létre, és a csúszásban részt vevő szemcsék közötti koordináció miatt a teljes maradék feszültség egyenletesen oszlik el. [18]

A VSR elsősorban egy bizonyos amplitúdójú és frekvenciájú váltakozó ciklikus feszültségnek az anyagra történő alkalmazása, úgy, hogy az anyag a mikroszerkezeti deformációval járó, egyes szemcsék előfordulásának rugalmas tartományában legyen. Eközben a ciklikus feszültség alatt a nagy feszültségű régióban bekövetkező mikroszkopikus plasztikus deformáció „kényszerítheti” a mikroszkopikus plasztikus deformációt az alacsony feszültségű régióban is. Egyes szemcsék mikroszkopikus plasztikus deformációja és a mikroszkopikus plasztikus deformáció mértékének különbségei a különböző régiókban az anyag egészét széles rugalmas feszültségtartományra osztják és csökkentik, így hatékonyan kiküszöbölve és homogenizálva a maradék feszültséget. [18]

Egyszerűbben: a vibráció akkor csökkenti tartósan a maradó feszültséget egy szemcsében, ha annak anyaga legalább mikro-szinten megfolyik, tehát diszlokációi elmozdulnak és új egyensúlyi állapotba rendeződnek. Ez teljesen összhangban áll az MD szimulációk tapasztalataival és a kísérleti tényekkel. Termodinamikai szempontból mindez úgy is értelmezhető, hogy az anyag belső energiájának csökkentésére törekszik: a vibráció megszűnte után csak akkor stabilizálódik alacsonyabb szinten a belső energia (és ezzel a feszültség), ha a rendszer utasítást kapott a mikrostruktúráját átrendezni – ezt a diszlokációk lokális elcsúszása valósítja meg, mivel így a rácstorzulások mérséklődnek, azaz a belső rugalmas energia lecsökken. A diszlokációk szaporodása, kioltódása és átrendeződése azonban nem pillanatszerű, hanem egy kvázi-statikusszerű folyamat (időt igényel), ezért a modellben a relaxáció fokozatosnak adódik: a ciklikus terhelés minden egyes félciklusa után egy kicsit kevesebb maradó feszültség marad, ahogy egy-egy diszlokációs rugó végleg megnyúlik vagy összenyomódik (mikroplasztikusan deformálódik). Végül soron a modell alátámasztja azt a képet, miszerint a VSR lényege a belső rugalmas (torziós) energia folyamatos felszabadítása a diszlokációk mozgatásán keresztül, amelynek eredményeként a maradó feszültség relaxálódik, és az anyag belső feszültségeloszlása homogénebbé válik.

4. Kihívások és korlátok

A vibrációs feszültségcsökkentés az elmúlt évtizedek kutatásai alapján ígéretes és sok esetben bevált eljárás, de számos kihívással áll még a kutatók előtt.

A VSR működésének pontos megértése sokáig bizonytalan volt, ezért a módszert főként empirikusan alkalmazták, a paramétereket tapasztalati alapon választva, ez bizonytalanságot vitt az eredményekbe. Bár ma már léteznek modellek, továbbra is nehéz előre jelezni a feszültségcsökkenést különböző anyagok és geometriák esetén. A rezonanciafrekvencia-eltolódás mérése bevett szokás a kutatók körében, de ez csak közvetett információt ad. A pontos feszültségmérések (pl. röntgendiffrakció, lyukfúrás) időigényesek ezért iparilag gyakran nem kivitelezhetők. Ezért a valós idejű vagy nem roncsoló monitorozás kifejlesztése fontos feladat: például a Rao-féle dinamikus feszültség alapú kiértékelés jó kezdet, de további validálás kell különféle anyagokra [8]. Felmerültek ötletek akusztikus mérésre vagy mágneses módszerekre (pl. a magnetoelasztikus hatás kihasználásával) a rezgés alatti feszültségváltozás detektálására, de ezek még fejlesztés alatt állnak [14] [16] [17].

Anyagfüggés és homogenitás vizsgálata szintén egy kutatásra szoruló terület. Nem minden anyag reagál egyformán jól a vibrációs öregítésre. A kutatások többsége acélokra és alumíniumötvözetekre koncentrált – ezeknél sikerült is jelentős feszültségcsökkenéseket elérni [12] [13]. Ám például az öntöttvas (ridegebb, gázzáróanyag) vagy a különlegesen hőkezelt acélok esetén vegyes eredményeket jelentettek [7]. Sun a kutatásában utalt rá, hogy az öntvényeknél a VSR gyakran csak a csúcspontokat csökkenti, az alapszintet nem [7]. Ennek oka lehet az anyag magas csillapítási tényezője (a vibrációs energia hővé alakul a mikrorepedésekben, nem pedig diszlokációmozgásra fordítódik), illetve a heterogén mikrostruktúra. Kihívás tehát a különböző anyagokhoz adaptált eljárás kidolgozása. Egy másik anyagfüggő tényező a hőmérséklet: bizonyos anyagoknál a melegítés (TVSR) drasztikusan javítja a hatást, míg másoknál kevésbé. Az optimális hőmérséklet anyag- és állapot-specifikus, így ennek meghatározása is korlátozó tényező (pl. az Al-ötvözeteknél ~150–200°C, acéloknál akár 200–300°C javasolt, de pontos értékeket kevés publikáció ad meg) [14] [15] [16].

Nagyméretű, bonyolult geometriájú szerkezeteknél kérdés, hogy a vibráció mennyire hatol be a térfogat mélyére, így a geometria és méret hatás további kutatást igényel. A legtöbb mérés a felületi vagy pontszerű feszültségadatokra támaszkodik, így nem mindig tudjuk, hogy egy vastag munkadarab középpontjában csökkent-e a feszültség. A mechanizmusból adódóan a vibráció inkább a makrofeszültségek redistribúcióját segíti (kiegyenlítését), de teljes "nullázás" – főleg belső pontokban – ritkán érhető el. Dawson is megfigyelte, hogy bár a felületen közel nullára csökkent a feszültség, az anyag belsejében maradt némi feszültség, igaz annak eloszlása egyenletesebb [4]. Ez a heterogén csökkenés okozhat problémát bizonyos alkalmazásoknál, ahol a teljes keresztmetszeten alacsony feszültség kívánatos.

A korai kutatások között találunk látszólagos ellentmondásokat a módszer hatásosságát és az optimális kezelési paramtereket tekintve [1-5]. Napjainkra ezeket az ellentéteket feloldották és

tudományos magyarázatokkal indokolták, illetve finomították a korábbi megállapításokat [14] [15] [18]. Például amplitúdó tekintetében Song (2024) vagy Dawson (1980) szerint “minél nagyobb, annál jobb” a hatás (bizonyos határig) [4] [18], míg Gao (2018) figyelmeztet, hogy alumíniumnál a túl nagy amplitúdó rontja a fáradást és nem hoz extra feszültségcsökkenést [13]. Ezt az ellentmondást az anyagok viselkedése feloldhatja, acéloknál a magas amplitúdó sem indít be számottevő fáradási károsodást a vizsgált tartományban, míg az alumínium képlékenyebb és érzékenyebb a ciklikus túlterhelésre (kisebb repedésterjedési küszöb).

A rezgési frekvencia szerepe is hasonló ellentmondásokba ütközött korábban. Egyes gyakorlati kézikönyvek hangsúlyozták a pontos hangolást, míg tudományos szempontból a frekvencia a rezonancia-aspektus miatt érdekes. Ma már látjuk, hogy a rezonancia tartomány eltalálása kritikus – de azon belül nem feltétlen az első módusz a legjobb, adott geometria esetén akár magasabb móduszt is érdemes lehet gerjeszteni, ha az ad erősebb belső igénybevételt. Tehát a paraméterek optimalizálása továbbra is egy rendkívüli kihívás, minden új szerkezetnél kísérletileg vagy szimulációval előzetesen ki kell kísérletezni a megfelelő frekvencia- és amplitúdóbeállítást, ami idő- és erőforrás-igényes feladat. [9] [10] [14]

Az ipari és mérnöki életben az eljárás elfogadottságának egyik fő gátja a korai kutatásokban megjelent fáradási élettartamra tett megállapítás, ugyanis a mérnökök félnek attól, hogy az optimalizált alkatrészek élettartama romlik. Dawson konklúziója szerint a teljes stresszmentesítés nem lehetséges némi fáradási élet feláldozása nélkül [4]. Gao (2018) ezt számszerűsítette is alumínium alkatrész esetén, nem megfelelő paraméterekkel ~11%-os élettartam-csökkenés is bekövetkezhet, de optimális, finomhangolt paraméterekkel ez a fáradási határ akár ~11%-os fáradási élettartam növekedést is eredményezhet [12]. Korlát tehát, hogy bizonyítani kell a vibrációs kezelés ártalmatlanságát az adott alkalmazásban.

A hőkezeléses stresszmentesítésre vannak ipari szabványok (pl. idő-hőmérséklet görbék anyagonként), addig a VSR-re kevés szabvány vagy útmutató létezik, így a standardizáció hiánya nehezíti a VSR technológia széleskörű terjedését. Igaz, hogy napjainkra már léteznek modellek, amelyekkel kellő pontossággal előre jelezhető a folyamat végeredménye, de ezek anyag és geometria függő bonyolult megoldások, amelyek jelentős szoftver igénnyel rendelkeznek. Illetve nincs általánosan elfogadott minőségbiztosítási eljárás arra, hogyan ellenőrizzük, hogy a VSR valóban sikeres volt (leszámítva a drága maradó feszültség mérést vagy a roncsolásos deformáció alapú lyukfúrásos megoldást).

Összességében a VSR kihívásai abból fakadnak, hogy egy soktényezős, anyagfüggő folyamatról van szó, melynek hatásai nehezebben jelezhetőek előre, mint a klasszikus hőkezelésé. Ugyanakkor a kutatások fejlődésével ezen korlátok egy része kezelhetővé válik a jövőben.

5. Jövőbeli kutatási lehetőségek

A vibrációs feszültségmentesítés területén számos fejlesztési és kutatási irány körvonalazódik. Az egyik fő irány a kombinált technikák továbbfejlesztése, amelyek segítségével szinergikus hatások érhetőek el. A termikus-vibrációs stresszmentesítés (TVSR) ígéretes eredményei rávilágítanak arra, hogy a hagyományos eljárások ötvözésével szinergikus hatás érhető el [1] [15] [17]. A jövőben érdemes kutatni az optimális kombinációkat (anyag, hőmérséklet, vibráció). Emellett más energiabeviteli módokkal is kombinálható a vibráció. Felmerült a mágneses térrel segített vibrációs öregítés, amely ferromágneses anyagoknál a magnetosztrikció jelenségét kihasználva segítheti a diszlokációk mozgását. Friss kutatásokban vizsgálták a mágneses + vibrációs öregítés hatását acélon, és előzetes eredményeik szerint a mágneses tér tovább növelte a feszültségcsökkentés mértékét a tisztán mechanikus vibrációhoz képest, különösen ferromágneses anyagban [1] [17]. Hasonlóképpen szóba jöhet az ultrahangos rezgés alkalmazása bizonyos esetekben: míg a hagyományos VSR néhány tíz Hz – pár száz Hz tartományban működik, az ultrahangos vibráció (20 kHz) nagyon kis amplitúdó mellett is mikroszkopikus rezgéseket kelt az anyag rácsában, ami bizonyos feltételek mellett hozzájárulhat a maradó feszültség relaxációjához (ezt eddig főként alumínium hegesztési varratok lokális kezelésekor vizsgálták) [19]. A jövőben tehát a komplex szinergikus eljárások új lehetőségeket jelenthetnek.

Az ipari digitalizáció és az Ipar 4.0 megoldások előretörése új lehetőségeket nyithat a VSR-eljárások adaptív, valós idejű vezérlésében és monitorozásában. A folyamat szenzorokkal való

támogatása – például beépített gyorsulásmérők és nyúlásmérők alkalmazásával – lehetővé teszi, hogy a vezérlőrendszer a mért dinamikus válaszok alapján automatikusan hangolja a gerjesztés frekvenciáját és amplitúdóját az optimális hatás érdekében. Walker (1995) már korán demonstrálta egy rezonancia-után szabályozó rendszer alkalmazhatóságát [5]. A valós idejű monitorozás szerepe szintén fontos lehet. Ideális esetben a rendszer képes lenne jelezni, hogy a művelet elérte a további feszültségcsökkenés szempontjából már nem hatékony tartományt, azaz a folyamat „plató” szakaszát. Ehhez ígéretes kutatási irány lehet az akusztikus emisszió monitorozása, mivel a mikroplasztikus folyamatok hangfrekvenciás jelek formájában detektálhatók, és ezek aktivitásának lecsökkenése a diszlokációmozgás megszűnésére utalhat. Hasonló módon a magnetoelasztikus hatáson alapuló mérések – például a mágneses permeabilitás változásának követése – szintén információt szolgáltathatnak a feszültségrelaxáció előrehaladásáról acél alapanyagok esetén [17]. Az ilyen valós idejű indikátorok alkalmazása jelentősen hozzájárulhat a kezelési idő és paraméterek optimalizálásához, a túlkezelés elkerüléséhez, valamint a folyamat reprodukálhatóságához.

További kutatási területet jelentenek a különböző anyagok és mérettartományok. A VSR alkalmazása az új megmunkálási technológiák által előállított alkatrészekre, mint a 3D nyomtatott (additívan gyártott) fém alkatrészek, amikben rendkívül magas és komplex maradó feszültségek maradhatnak a gyors hűlés és rétegezés miatt. Ezek vetemedéseket, és deformációkat okoznak, illetve csökkentik az alkatrészek élettartamát. Ezek stresszmentesítésére gyakran hagyományos hőkezeléses eljárást alkalmaznak. Ez torzíthatja a geometriát, ugyanis sok esetben a fémek előbb lágyulnak ki, mint, ahogy a feszültség leépülne bennük. Illetve a kiválóan keményedő anyagok esetén a hőkezelés anyagszerkezeti változásokat okozhat. A vibrációs kezelés egy kíméletesebb alternatíva lehet, de ezt alig vizsgálták még modern additív anyagok esetén. A másik irány a mikroméretű vagy vékony alkatrészek (pl. mikroelektronikai komponensek, vékony falú precíziós részek) kezelése. Itt a klasszikus VSR túl durva lehet, viszont az ultrahangos vibráció vagy a precíz hangolt mikrovibráció segíthet [1].

Gao és munkatársai munkája rávilágított a fáradás kérdésre, de további kutatás kell, hogy anyagspecifikusan megállapítsuk, hogy mekkora az a vibrációs terhelés, ami még biztonságos, sőt akár előnyös is a fáradási élettartam szempontjából. Ezt érdemes lehet minden anyagra kiterjeszteni, nem csak alumíniumra [12] [15]. A jövőbeli kísérletekben kombinált mechanikai fárasztóvizsgálatok és rezgéses kezelés alkalmazásával élettartam görbéket lehetne felvenni. Ez

fontos input a mérnöki tervezéshez és ahhoz, hogy a VSR-t szélesebb körben elfogadják kritikus szerkezeteknél is.

A végső ipari térnyeréshez standardizálás, minőségbiztosítás és kidolgozott mérési módszerek kellene. Ehhez a meglévő adatok rendszerezése és kibővítése szükséges. Valószínűleg a jövő kutatásai a kombinált, szinergikus kezelések felé fordulnak, de ennek alapvető feltétele a VSR eljárás feltérképezése. A végső cél egy olyan megbízható, előre tervezhető eljárás kialakítása, amely minimalizálja a belső feszültségeket anélkül, hogy bármilyen káros mellékhatást okozna az alkatrészben.

6. Következtetések és kihívások

A vibrációs feszültségmentesítés (VSR) több, mint 40 éves fejlődésen ment keresztül. A kutatásfejlesztése tapasztalati oldalról indult és napjainkra jutott el oda, hogy léteznek megfelelő pontosságú modellek. Ezen modellek futtatása rendkívül szoftver és hardver igényes feladat, illetve csak korlátozott anyagminőségekre áll rendelkezésre, ezért sok kutató még napjainkban is empirikus alapon dolgozik.

Vibrációs gerjesztéssel kombinált molekuladinamikai szimulációk kellő pontossággal képesek modellezni a valós hatásokat. Ezeknek a segítségével bizonyított, hogy a diszlokációk elterjedése és mozgása a feszültség „relaxációjának” fő oka. A plasztikus tartományban, amikor a diszlokációk elkezdnek mozogni, az anyagban tárolt rugalmas feszültség jelentős része hirtelen felszabadul, ezáltal csökkentve a belső feszültség szintjét. Ezt a jelenséget az atomi rendszerek energiájának változása kíséri. Amikor a diszlokációk kialakulnak és elcsúsznak, a teljes atomi potenciális energia hirtelen csökken, mivel a rugalmas deformációban tárolt energia egy része a diszlokációk létrehozására és mozgatására használdik fel. A diszlokációk további mozgása és felhalmozódása később az energia újbóli emelkedését okozhatja (mivel az egymással kölcsönhatásban lévő

diszlokációk rendezetlenségét és helyi feszültségkoncentrációkat hoznak létre a rendszerben), de amikor a felhalmozódott diszlokációk „átugranak” egy akadályon, vagy felszabadulnak a szemcsehatáron, az energia ismét csökken. A folyamat így a diszlokációk kialakulása, mozgása és eltűnése révén dinamikus egyensúlyt hoz létre.

Az eredmények szerint a VSR hatékonyságát elsősorban a gerjesztő frekvencia és az amplitúdó megfelelő megválasztása határozza meg. Megkülönböztetünk rezonáns és nem rezonáns esetet. A frekvencia hatás a rezonancia miatt fontos nem a Hz abszolút számértékétől. Rezonancia közeli gerjesztés esetén, kis amplitúdó is nagy dinamikus feszültséget kelt az anyagban (a rezonancia erősítő hatásnak köszönhetően), így hatékony feszültség-relaxáció indul meg. Nem rezonáns esetben is lehetséges a hatékony feszültség csökkentés, de itt akár egy-két nagyságrenddel nagyobb amplitúdó is szükséges lehet a hatékony feszültségcsökkentéshez (gyakorlatban sokszor ez fordul elő). Az optimális VSR kezelés a munkadarab sajátfrekvenciájának a közelében, de kissé alatta történik (szubrezonancia tartomány) és az amplitúdó a lehető legnagyobb biztonságos érték (hogy minél nagyobb dinamikus feszültség lépjen fel a munkadarabban). Tehát a sajátfrekvencia vizsgálata és mérése fontos.

A VSR technológia egy sokparaméteres összetett folyamat, amelynek eredménye jelentősen függ az alapanyagtól is. Fontos kutatási irány és kihívás a fáradási élettartamra gyakorolt hatásnak a tisztázása (pl.: eltérő eredmények acél és alumínium esetén). Érdekes jövőbeli kutatási irány lehet a felharmonikusok szerepének a vizsgálata. Amennyiben több sajátfrekvencia is beleesik a kezelési tartományba, érdemes lehet megvizsgálni a további felharmonikusok hatását. Szintén érdekes kutatási irány a VSR hatása a deformációra, különösen új innovatív gyártástechnológiáknál, eltérő geometriáknál és anyagoknál (pl. MIM technológia, vagy fém 3D nyomtatás). A VSR technológia kombinálása és szinergikus módszerek kidolgozása és kutatása szintén nagy potenciált rejt magában (pl.: hőbevitellel, mágnességgel stb.).

A VSR technológia ipari elterjedéséhez elengedhetetlen a standardizáció. Mérési és minőségbiztosítási módszerek kidolgozása szükséges, amelyek gyorsak és egyértelműek. Jövőbeli kihívás, hogy a technológia anyag típusonként kimért görbékkel rendelkezzen, amelyek alapján a beállítási paraméterek kiválaszthatók és a végeredmény előre jelezhető.

Irodalomjegyzék

- [1] Huang, G., Liu, R., & Hu, S. (2023). Investigation of the mechanism for reduction of residual stress through magnetic-vibration stress relief treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 582, 171041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171041>
- [2] Sonsino, C. M., Müller, F., Back, J. D., & Gresnigt, A. M. (1996). Influence of stress relieving by vibration on the fatigue behaviour of welded joints in comparison to post-weld heat treatment. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 19(6), 703-708.
- [3] Li, S., Fang, H., & Cui, W. (2018). Critical natural frequency: an improved empirical effectiveness criterion in vibration stress relief of rectangle welded plates. *Vibroengineering Procedia*, 18, 85-90. DOI: <https://doi.org/10.21595/vp.2018.19566>
- [4] Dawson, R., & Moffat, D. G. (1980). Vibratory stress relief: a fundamental study of its effectiveness.
- [5] Walker, C. A., Waddell, A. J., & Johnston, D. J. (1995). Vibratory stress relief—an investigation of the underlying processes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 209(1), 51-58. asd
- [6] Sun, M. C., Sun, Y. H., & Wang, R. K. (2004). The vibratory stress relief of a marine shafting of 35# bar steel. *Materials Letters*, 58(3-4), 299-303. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00473-7](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00473-7)
- [7] Li, Q. B. (1986, August). The report on vibratory stress relieving process of casting iron blanks of machine. In *Proceedings of the 1st North China Conference on VSR Process* (pp. 11-17).
- [8] Rao, D., Wang, D., Chen, L., & Ni, C. (2007). The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress. *International Journal of Fatigue*, 29(1), 192-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.02.047>
- [9] Zhao, X. C., Zhang, Y. D., Zhang, H. W., & Wu, Q. (2008). Simulation of vibration stress relief after welding based on FEM. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 21(4), 289-294. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60051-4](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60051-4)
- [10] Yang, Y. P. (2009). Understanding of vibration stress relief with computation modeling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(7), 856-862. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9310-9>
- [11] Wang, J. S., Hsieh, C. C., Lin, C. M., Chen, E. C., Kuo, C. W., & Wu, W. (2014). The effect of residual stress relaxation by the vibratory stress relief technique on the textures of grains in AA 6061 aluminum alloy. *Materials*

Science and Engineering: A, 605, 98-107.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.037> [Get rights and content](#)

- [12] Gao, H., Zhang, Y., Wu, Q., Song, J., & Wen, K. (2018). Fatigue life of 7075-T651 aluminium alloy treated with vibratory stress relief. *International Journal of Fatigue*, 108, 62-67.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.11.011>
- [13] Gong, H., Sun, Y., Liu, Y., Wu, Y., He, Y., Sun, X., & Zhang, M. (2018). Effect of vibration stress relief on the shape stability of aluminum alloy 7075 thin-walled parts. *Metals*, 9(1), 27.
DOI: <https://doi.org/10.3390/met9010027>
- [14] Ebrahimi, S. M., Farahani, M., & Akbari, D. (2019). The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5), 2147-2158.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03288-y>
- [15] Gao, H., Wu, S., Wu, Q., Li, B., Gao, Z., Zhang, Y., & Mo, S. (2020). Experimental and simulation investigation on thermal-vibratory stress relief process for 7075 aluminium alloy. *Materials & design*, 195, 108954.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108954>
- [16] Song, H., Gao, H., Wu, Q., & Zhang, Y. (2021). Effects of segmented thermal-vibration stress relief process on residual stresses, mechanical properties and microstructures of large 2219 Al alloy rings. *Journal of Alloys and Compounds*, 886, 161269.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161269>
- [17] Huang, G., Zhang, Q., Zhang, B., & Li, S. (2021). Microscopic mechanism of the combined magnetic-vibration treatment for residual stress reduction. *Results in Physics*, 29, 104659.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104659>
- [18] Song, H., Gao, Z., Zhou, X., Zhang, Q., & Zhang, B. (2024). Research on the evolution law and control mechanism of residual stress under vibration stress relief. *Materials Today Communications*, 40, 110072.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110072>
- [19] Zhang, Q., Yu, L., Shang, X., & Zhao, S. (2020). Residual stress relief of welded aluminum alloy plate using ultrasonic vibration. *Ultrasonics*, 107, 106164.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106164>