

REZGÉSEN ALAPULÓ ALTERNATÍV FESZÜLTSGCSÖKKENTŐ MÓDSZEREK HATÁSMECHANIZMUSAINAK LEGFRISSEBB ÁTTEKINTÉSE

LATEST REVIEW OF THE MECHANISMS OF VIBRATION-BASED ALTERNATIVE STRESS-RELIEF METHODS

Szigeti Botond 0009-0005-3605-854 1*

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem
<https://doi.org/10.47833/2026.2.ENG.003>

Kulcsszavak:

TVSR
mikroplasztikus deformáció
belső feszültség
VSR
frekvencia

Keywords:

TVSR
microplastic deformation
internal stress
VSR
frequency

Cikktörténet:

Beérkezett 2026. február 16.
Átdolgozva 2026. április 16.
Elfogadva 2026. május 15.

Összefoglalás

A tanulmány célja a rezgésalapú feszültségcsökkentő eljárások működési mechanizmusának vizsgálata és a legfrissebb kutatási eredmények összehasonlító elemzése. A szakirodalom alapján bemutatom, hogy a legújabb elméleti és kísérleti vizsgálatok szerint a rezgés hatására létrejövő mikroplasztikus deformációk és a diszlokációmozgás miként járulnak hozzá a maradó feszültségek relaxációjához. Az eredmények azt mutatják, hogy a feszültségcsökkenés mértéke erősen függ a frekvencia, az amplitúdó és a dinamikus feszültség megfelelő kombinációjától. A TVSR-vizsgálatok szerint a mérsékelt hőmérséklet vibrációval együtt jelentősen növeli a diszlokációk mobilitását, ezáltal nagyobb feszültségcsökkentés érhető el, mint a hagyományos vibrációs eljárásokkal. A tanulmány összegzi a módszerek jelenlegi korlátait, és kijelöli azokat a további kutatási irányokat, amelyek a technológia ipari szintű stabilizálásához szükségesek.

Abstract

The aim of this study is to examine the operating mechanism of vibration-based stress relief processes and to conduct a comparative analysis of the latest research results. Based on the literature, I show how, according to the latest theoretical and experimental studies, microplastic deformations and dislocation motion caused by vibration contribute to the relaxation of residual stresses. The results show that the degree of stress reduction strongly depends on the appropriate combination of frequency, amplitude, and dynamic stress. TVSR studies show that moderate temperature combined with vibration significantly increases dislocation mobility, resulting in greater stress reduction than conventional vibration methods. The study summarizes the current limitations of the methods and outlines further research directions necessary for the industrial stabilization of technology.

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: szigeti.botond@nje.hu

1. Bevezetés

A gyártási folyamatok során kialakuló maradó, más néven belső feszültségek a nem egyensúlyi hőmérsékleti és alakváltozási állapotok rögzüléséből erednek, és alapvetően befolyásolják a szerkezeti elemek méretstabilitását, integritását, valamint fáradási és törésmechanikai viselkedését. A húzó jellegű maradó feszültségkomponensek csökkentik a megengedhető üzemi terhelési szintet, elősegítik a fáradási repedések korai kialakulását és gyorsítják azok terjedését, ami közvetlenül rontja az alkatrészek élettartamát. E kedvezőtlen hatások különösen akkor válnak meghatározóvá, amikor a feszültségmezők nagy amplitúdójúak és térben erősen inhomogének, mivel ez hosszabb távon geometriai instabilitáshoz, időben késleltetett alakváltozásokhoz és váratlan meghibásodásokhoz vezethet. A maradó feszültségek csökkentésére alkalmazott hagyományos hőkezelési eljárások ugyan hatékonyak, azonban jelentős energia- és költségigényük, valamint a mechanikai tulajdonságok nemkívánatos módosulásának kockázata miatt alkalmazásuk számos esetben korlátozott. Ezen korlátok ösztönözték az alternatív mechanikai alapú technológiák fejlesztését, köztük a rezgéses feszültségcsökkentés továbbfejlesztett változatát, a termorezgéses feszültségcsökkentést (TVSR – Thermal Vibratory Stress Relief), amely a mechanikai rezgések és az alacsony hőmérsékletű hőterhelés kombinációjával törekszik a belső feszültségek hatékony relaxációjára. A módszer energiahatékony megközelítést kínál, ugyanakkor működési mechanizmusa, valamint a rezgés- és hőparaméterek optimális megválasztása továbbra is aktív kutatás tárgyát képezi, ami indokoltá teszi a jelenség mélyebb, elméleti és kísérleti vizsgálatát. [1] [2] [3] [4]

Jelen tanulmány célja a vibrációs és termikus–vibrációs feszültségcsökkentő eljárások (VSR, TVSR) működési mechanizmusainak összefoglaló és kritikai áttekintése, különös hangsúllyal a 2020 utáni kutatási eredményekre. A publikáció rendszerezetten bemutatja a VSR elméleti modelljeit, a fő rezgésparaméterek (frekvencia, amplitúdó, dinamikus terhelés) hatását a feszültségrelaxációra, valamint a különböző anyagokon és geometriákon végzett vizsgálatok módszertani eltéréseiből adódó következtetéseket. A tanulmány kitér a TVSR-rel kapcsolatos legújabb fejlesztési irányokra és hőmérsékletfüggő mechanizmusokra is, és azonosítja a jelenleg fennálló korlátokat és azokat a nyitott kérdéseket, amelyek a technológia további fejlesztéséhez és ipari szintű standardizálásához szükségesek.

2. Áttekintés

A maradó feszültségek hatékony csökkentése alapvető jelentőségű a korszerű gyártástechnológiákban, mivel közvetlen hatással van az anyagok szilárdságára, fáradási élettartamára és geometriai stabilitására. A hagyományos hőmérsékleti feszültségcsökkentés (TSR) iparilag jól bevált módszer, azonban jelentős idő- és energiaigénnyel jár, különösen akkor, ha oxidációra hajlamos anyagok miatt védőgáz vagy vákuumkörnyezet szükséges [5]. A rezgésen alapuló feszültségcsökkentés (VSR) ezzel szemben alacsony költségű és gyors alternatíva, amely ciklikus dinamikus terhelés révén képes mikroplasztikus elmozdulásokat és diszlokációrendeződést létrehozni [6] [7]. Hatásmechanizmusa azonban több tekintetben érzékeny a technológiai paraméterekre – különösen a frekvenciára, az amplitúdóra és az anyag fáradási határára –, ezért határfoka nem minden esetben reprodukálható, és a módszer korlátai különösen nagy szilárdságú, illetve bonyolult keresztmetszetű alkatrészeknél mutatkoznak meg [8]. A VSR mikrostrukturális működését kísérletileg Song és munkatársai igazolták, akik kimutatták, hogy a dinamikus terhelés a diszlokációk mobilizálásán keresztül a rugalmasan tárolt belső energia csökkenését és a feszültségmező fokozatos homogenizációját idézi elő anélkül, hogy számottevő mikroszerkezeti átalakulást okozna [9]. Az eljárás alkalmazhatóságát tovább erősítették Xu és Liu eredményei, akik nagyfrekvenciás vibrációs kezeléseknél szerkezeti acélokban jelentős feszültségcsökkenést értek el, miközben elkerülték a TSR-re jellemző mikrostrukturális változásokat és dimenzionális torzulásokat, ami azt mutatja, hogy a VSR önmagában is alkalmas kontrollált belső energia-modifikációra [10].

A VSR korlátai azonban világosan kijelölték az utat a kombinált termikus–rezgéses feszültségcsökkentés (TVSR) irányába, amely a hőkezelés és a vibráció szinergikus hatását használja ki. A megemelt hőmérséklet csökkenti az anyag folyáshatárát és növeli a diszlokációmozgások intenzitását, így a vibrációs terhelés sokkal alacsonyabb dinamikus feszültség szinten is képes mikroplasztikus csúszást kiváltani. A TVSR-rel elérhető hatások ennek

megfelelően jelentősen meghaladja mind a VSR, mind a TSR teljesítményét. A módszer hőmérsékletfüggő működését elsőként Lv és Zhang igazolták 7075 alumíniumon, ahol a kombinált kezeléssel 55,9% maradófeszültség-csökkenést értek el a VSR 13,4%-ával szemben [11]. Gao és munkatársai részletesen vizsgálták a termikus–dinamikus hatások kölcsönhatását, és kimutatták, hogy a TVSR hatékonysága a VSR-hez képest ~38,6%, a TSR-hez képest pedig ~20,4% többleteredményt biztosít; emellett a diszlokációsűrűség kimutatható növekedése igazolja a mikroplasztikus relaxáció aktiválódását [12]. A módszer eredményességét több alumíniumrendszerben is igazolták: 2219 ötvözet hegesztett varratain a kombinált kezelés jelentősen csökkentette mind a longitudinális, mind a transzverzális feszültségcsúcsokat, jóval meghaladva a VSR és TSR külön alkalmazásának hatékonyságát [9]. A TVSR különösen nagy előnyt mutat hőre érzékeny vagy nagy szilárdságú anyagok esetén; Ti6Al4V ötvözetben például a maradó feszültségek több mint 90%-a oldódott fel a kombinált eljárással, ami több mint négyszerese a pusztán hőkezeléssel elérhető redukciónak [13]. Additív gyártású anyagoknál, különösen SLM-mel készült Ti6Al4V komponenseknél, a TVSR kiemelkedően hatékornak bizonyult: mérsékelt, ~380 °C-os kezelési hőmérséklet mellett ~86% feszültségcsökkenést mértek, ami 63%-kal meghaladta a VSR, és ~76%-kal a TSR eredményét azonos körülmények között, ezt az 1. táblázat foglalja össze [14].

1. Táblázat. A belső feszültségek leépülése a metódusok alapján.

Módszer	Feszültség csökkenése [%]
TSR	49
VSR	53
TVSR	86

A kombinált eljárás így képes kiküszöbölni a VSR korlátait, miközben elkerüli a magas hőmérsékletű TSR mikrostruktúra-változásaiból fakadó hátrányokat. Ennek megfelelően a TVSR a rezgésalapú technológiák továbbfejlesztett és anyagtudományi szempontból indokolt alternatívája, amely nagyobb hatásfokkal és reprodukálhatósággal kezeli a maradó feszültségeket [13].

2.1. A VSR technológia aktuális módszertani áttekintése

Az utóbbi években, különösen 2020 után a VSR technológia újból a tudományos kutatások fókuszába került. Számos friss tanulmány vizsgálta a vibrációs utókezelés hatásait különböző anyagokon és szerkezeteken, gyakran összehasonlítva azt a hagyományos hőkezeléses feszültségcsökkentéssel. Serrati és munkatársai hegesztett ASTM A131 EH36 hajóacél lemezeken végzett vizsgálatai igazolták, hogy mind a termikus, mind a vibrációs feszültségcsökkentő kezelés mérsékli a hegesztési maradó feszültségeket és módosítja az anyag mechanikai tulajdonságait. A termikus kezelés nagyobb mértékű feszültségrelexációt eredményezett a magas hőmérsékleten aktiválódó diffúziós és képlékeny alakváltozási mechanizmusok következtében, míg a vibrációs kezelés hatása elsősorban ciklikus igénybevétel által kiváltott lokális feszültség átrendeződéshez köthető. A vibrációs feszültségcsökkentés szabványosíthatatlansága ellenére költséghatékony alternatívát jelenthet nagyméretű, komplex vagy hőkezelésre érzékeny szerkezetek esetében, ahol a termikus eljárások alkalmazása korlátozott, ezért alkalmazása elsősorban kiegészítő vagy célzott megoldásként értelmezhető, ami indokolja a módszer további célzott vizsgálatát és megbízható értékelési keretrendszerének kidolgozását [15].

Más kutatások a vibrációs feszültségcsökkentés alkalmazhatóságát vizsgálták különböző anyagminőségek és gyártási technológiák esetén. Vardanjan és munkatársai hidegen hengerelt AA2024 alumíniumötvözetben hasonlították össze a vibrációs és a hagyományos hőkezeléses feszültségcsökkentő eljárásokat. Eredményeik szerint a VSR-kezelés az alak- és mérettartás, a szakítószilárdság, valamint a rugalmassági modulusz tekintetében mintegy 25%-kal kedvezőbb javulást eredményezett a hőkezeléshez képest. A megfigyelt különbség arra utal, hogy a vibrációs kezelés hatékonyabban segíti elő a hidegalakítás során felhalmozódott belső feszültségek részleges relaxációját anélkül, hogy a mikroszerkezetet a magas hőmérséklethez kapcsolódó kedvezőtlen átalakulások érintenék. Az eredmények alapján bizonyos hidegalakított könnyűfém szerkezetek

esetében a VSR nemcsak alternatív, hanem mechanikai szempontból hatékonyabb feszültségcsökkentő eljárásnak is értelmezhető [16].

Számos friss tanulmány a vibrációs feszültségcsökkentés paramétereinek optimalizálására, illetve kombinált eljárások alkalmazására összpontosít. Servak és munkatársai (2024) alumíniumötvözet próbatesteken végeztek kísérleti és numerikus vizsgálatokat a vibrációs kezelés kulcsparamétereinek – így a rezgés amplitúdójának, frekvenciájának és ciklusszámának – hatására. Eredményeik szerint a paraméterek megfelelő megválasztása mellett a maradó feszültségek jelentős része oldható, és jól definiálható optimális tartományok léteznek, ahol a feszültségcsökkentés hatékonysága maximális. A feszültségrelaxáció elsősorban a legnagyobb húzó maradó feszültségekkel terhelt zónákban, jellemzően a felületi és geometriai átmenetek közelében, illetve a korábbi alakváltozással érintett kritikus keresztmetszetekben érvényesült. Hasonló megközelítést alkalmaztak Chen és munkatársai, akik 2219 alumíniumötvözet gyűrűk esetében kombinált hő- és vibrációs kezelést vizsgáltak. Kísérleteik kimutatták, hogy a hosszabb rezgési idő és a megnövelt hőntartási (szigetelési) idő csökkenti a maradó feszültségek maximális értékét, míg a túlzottan nagy rezgésamplitúdó kedvezőtlen módon akár növelheti is a feszültség szintet. Az eredmények alapján a vibrációs kezelés időtartama és intenzitása optimalizálható, és csak meghatározott paramétertartományon belül biztosítható a maximális feszültségcsökkentő hatás [17].

A vibrációs feszültségcsökkentés továbbfejlesztett megközelítései közé tartozik a mágneses elven gerjesztett vibrációval kombinált alacsony frekvenciájú kezelés, ahol a mechanikai és mágneses hatások időben átfedésben érvényesülnek. Huang és Li szilícium-acél mintákon vizsgálták ezt az eljárást, amely során 70 Hz frekvenciájú, ± 1.0 mm amplitúdójú mechanikai vibrációt alkalmaztak 20 percen keresztül, míg a váltakozó mágneses tér 50 Hz frekvencián, mintegy 2T indukcióval működött. A kezelés hatására a hosszanti és keresztirányú maradó feszültségek rendre 39.6%, illetve 27.8% mértékben csökkentek, miközben a makroszkopikus alakváltozás korlátozott maradt. A feszültségrelaxáció mikroszerkezeti változásokkal hozható összefüggésbe, a szemcseméret mérsékelt növekedése ($\approx 4.7\%$), a Goss-textúra enyhe erősödése, a szemcsehatárok szűkülése és a diszlokációsűrűség növekedése a lokális mikroplasztikus deformáció aktiválódására utal. Az eredmények alapján a maradó feszültségek csökkenése elsősorban a mágneses és mechanikai gerjesztés által létrehozott in-plane pulzáló húzófeszültségek szuperpozíciójának tulajdonítható [18].

A magas frekvenciájú vibrációs feszültségcsökkentés (HF-VSR High Frequency VSR) hatását Xu és Liu 45-ös szénacél próbatesteken vizsgálták, összehasonlítva azt különböző temperálási eljárásokkal. A HF-VSR kezelést 2160 Hz frekvencián és 10 μ m amplitúdóval alkalmazták, legfeljebb 25 perces időtartamban, amely során a maradó feszültség csökkenése közel lineárisan nőtt 5–15 perc között, majd telítődést mutatott és 63,0%-os feszültségcsökkentési arányt ért el. Ezzel szemben a 600 °C-on, 30 percig végzett temperálás közel 92,8%-os maradó feszültség-csökkenést eredményezett, azonban a mikroszerkezet temperált martenzitről temperált szorbitra alakult, amelyet jelentős keménységcsökkenés kísért ($\sim 50,8$ HRC $\rightarrow$ 22,8 HRC; 531,5 HV $\rightarrow$ 265,3 HV). A HF-VSR kezelés esetében a mikroszerkezet morfológiája változatlan maradt, a temperált martenzites állapot jól öröklődött, miközben a keménységcsökkenés mérsékelt volt ($\sim 6,9\%$). A szerzők a jelenséget a nagy frekvenciájú mechanikai energia által dominált diszlokáció-annihilációs folyamatokkal magyarázzák, amelyek hatékony feszültségrelaxációt eredményeznek mikroszerkezeti átalakulás nélkül. Az eredmények alapján a HF-VSR különösen előnyös tengeri alkalmazású acélszerkezetek esetében, ahol a maradó feszültségek csökkentése mellett az eredeti hőkezelt állapot és a mechanikai integritás megőrzése kritikus követelmény [19].

E kutatások modern mérés- és vizsgálati módszereket (pl. lyukfúrásos feszültségmérés, röntgen-diffrakció, mikroszkópos törésanalízis, számítógépes szimulációk) alkalmazva tárják fel a vibrációs kezelés hatásmechanizmusait. Főbb következtetésük, hogy a megfelelően alkalmazott vibrációs technológia számos esetben költséghatékony és hatásos alternatívája lehet a hőkezelésnek a maradó feszültségek csökkentésére. Ugyanakkor a hatás függ az alkalmazott paraméterektől és az adott anyag jellemzőitől, ezért további kutatások irányulnak a folyamat szabványosítására és a még nyitott kérdések, például a mikrostruktúra-változások és a hosszú távú élettartam kapcsolatának tisztázására [5] [20].

2.1.1. A vibrációs feszültségcsökkentés időfüggő viselkedése

A vibrációs feszültségcsökkentésben a kezelés időtartama meghatározza, hogy a ciklikus terhelés mekkora mértékben képes mikropasztikus deformációt és feszültség átrendeződést kiváltani a szerkezetben. A hagyományos hőntartásos feszültségcsökkentéssel szemben, amely órákig tartó hőterhelést és mikroszerkezeti módosulást okoz, a VSR percekben mérhető ciklusidővel működik. Wiecezowski és munkatársai nagyméretű hegesztett acélkereten végzett vizsgálatai szerint a 31,6–145 Hz közötti frekvenciákon, 3,5–7 perces lépcsőkben, összesen mintegy 35 perces VSR kezelés már elegendő volt a hegesztési eredetű maradó feszültségek jelentős részének feloldásához és a geometriai instabilitások megszűnéséhez. A rezgés hatására kialakuló sajátfrekvenciás gerjesztés gyors feszültségrelaxációt eredményezett, míg a kezeletlen próbadarab a kísérlet szerint napokon át további spontán alakváltozást mutatott. Ez igazolja, hogy az optimális kezelésideő-tartomány kritikus szerepet játszik a maradó feszültségek gyors és mikroszerkezeti változás nélküli csökkentésében [9].

A vibrációs feszültségcsökkentés időtartamának szerepét Chen és munkatársai 2219 alumíniumötvözet gyűrűkön részletesen vizsgálták, és kimutatták, hogy a TVSR-kezeléshez tartozó időparaméterek, rezgési idő, melegítési idő, hőntartási idő és hűtési idő növelése egyértelműen fokozza a feszültségrelaxáció mértékét. A numerikus és kísérleti eredmények szerint a maximális ekvivalens maradó feszültség az időtartamok növelésével folyamatosan csökken, és optimális paraméterek alkalmazásával akár 93,6%-os feszültségcsökkenés is elérhető. A túlzott dinamikus terhelés viszont, különösen a nagy vibrációs amplitúdó kontraproduktívnak bizonyult, mivel a maximális maradó feszültség növekedését idézte elő. Ez azt mutatja, hogy a kedvező feszültségcsökkentő hatás nem kizárólag a hosszabb kezelési idő, hanem az időtartam és az intenzitás együttes, optimalizált beállítása révén érhető el, amely a diszlokációk időfüggő relaxációs folyamatainak hatékony aktiválására épül [21].

Gao és munkatársai nagyfrekvenciás, 2160 Hz-es VSR-kísérletei 45-ös szénacélon kimutatták, hogy a maradó feszültségcsökkenés időfüggése gyors kezdeti relaxációval indul, majd lassuló ütemű, telítődő szakaszba megy át. Az első 5 perc rezgetés ~20%, 10–15 perc ~40–57%, míg 25 perc nagyfrekvenciás vibráció ~63% feszültségcsökkentést eredményezett.

A 15 → 25 perces intervallumban a relaxáció mértéke már csak ~6%-kal nőtt, ami a folyamat aszimptotikus jellegére és az időtartam növelésével járó csökkenő hatásintenzitásra utal. A gyors kezdeti csökkenés oka, hogy a nagyfrekvenciájú rezgés elején aktiválódik a diszlokációk legnagyobb hányada, míg hosszabb kezelési időnél a diszlokáció-annihiláció és a mikropasztikus átrendeződés üteme lelassul. A szerzők korábbi numerikus modellje szerint a TVSR esetén a maradó feszültségek túlnyomó része az első ~10 perc alatt oldódik fel, ha ezt megelőzően ~110 perces hőntartást alkalmaznak. Wang és kollégái alumíniumötvözeteken hasonló időfüggést figyeltek meg: AA6061 esetén a 20 perces rezgés ~40% relaxációt eredményezett, különösen magas kezdeti feszültség esetén. Ezek az eredmények egyértelműen jelzik, hogy a VSR-kezelésekben az első 10–20 perc a domináns feszültségoldási szakasz, míg az ezt követő rezgés már csak korlátozott, csökkenő hatékonyságú relaxációt biztosít [6] [22].

2.1.2. Az időtartam hatása különböző anyagszerkezetekben

A VSR időtartamának hatékonysága anyagfüggő, amit Gao és munkatársai 316L és Q345 hegesztett csatlakozásán igazoltak. Azonos vibrációs paraméterek mellett a 316L oldalon nagyobb feszültségcsökkenést mértek (longitudinális: 146,6 MPa, keresztirányú: 51,0 MPa), mint a Q345 acélon (110,1 MPa és 42,3 MPa). Ennek oka, hogy a 316L-ben magasabb kiinduló maradó feszültségek halmozódnak fel, valamint alacsonyabb folyáshatára miatt a rezgésből származó dinamikus terhelés hamarabb éri el a mikropasztikus deformáció létrejöttéhez szükséges feltételt. A Q345 nagyobb szilárdsága miatt adott idő alatt kisebb relaxáció érhető el, ezért hosszabb kezelés vagy nagyobb intenzitás szükséges. A megfigyelések arra utalnak, hogy a VSR-rel elérhető feszültségcsökkenés arányos a kezdeti feszültség nagyságával és fordítottan arányos az anyag folyáshatárával, így lágyabb vagy nagyobb sajátfeszültséggel terhelt anyagokon azonos idő alatt nagyobb relatív relaxáció következik be [22].

A rezgési időtartamot úgy határozták meg, hogy a folyamat makroszkopikus alakváltozást ne, csak szemcsehatárokon belüli mikropasztikus elmozdulásokat idézzon elő. Ez a megközelítés

biztosítja, hogy a feszültségcsökkenéshez szükséges diszlokáció-aktiválás megtörténjen, miközben a globális geometriát nem éri káros deformáció. A vizsgálat eredménye azt jelzi, hogy nagy méretű vagy heterogén szerkezetekben a feszültségrelaxáció nem feltétlenül egyetlen hosszú ciklussal optimalizálható, hanem több, szakaszolt vibrációs periódus, adott esetben köztes hőntartásokkal hatékonyabban biztosítja a lokális diszlokáció-annihilációt, miközben minimálisra csökkenti a kedvezőtlen alakváltozás kockázatát [6].

A TVSR-időtartam hatását SiC/Al kompozitokon vizsgáló kísérletek azt mutatták, hogy a rezgés önmagában csak korlátozott mértékű makroszkopikus feszültségcsökkentést eredményez, mert a mátrix mikroszkopikus maradó feszültsége alacsony, míg a SiC-részecskék nagy kompresszív mikrofeszültséget hordoznak, amely a vibrációra gyakorlatilag nem reagál. A vizsgálatban a mintákat 175 °C-ra hevítették, 10 percig rezgették, majd vagy azonnal lehűtötték, vagy további 110 percig hőntartották. A hosszabb hőntartás bizonyult hatékonyabbnak: a mikroszerkezeti viselkedéssel összhangban az Al-mátrix termikus relaxációja 175 °C-on intenzívebbé vált, ami fokozta a globális maradó feszültség leépülését. A hosszabb idő alatt csökkenő mikroszkopikus feszültségcsökkentést jelzi, hogy az Al-mátrix és a SiC szemcsék közötti hőtágulási különbségből származó inhomogén mikrofeszültségmező kiegyenlítődt, így a dinamikus terhelésre érzékenyebb mátrix hatékonyabban tudott plasztikusan rendeződni. Emiatt a kombinált eljárás, különösen a 175 °C + 10 perc vibráció + 110 perc hőntartás nagyobb feszültségcsökkentést ért el, mint a tisztán vibrációs VSR, miközben elkerülte a nagy hőmérsékletű TSR-re jellemző mikroszerkezeti károsodást.

Ez arra utal, hogy a TVSR optimális időparamétere nem a rezgési idő önálló növeléséből, hanem az azt kiegészítő hőntartási szakasz időtartamának szabályozásából adódik: a mátrix relaxációját a hő biztosítja, a vibráció pedig lokális mikro plaszticitást aktivál a dinamikus terhelés irányokban, ezért a két fázis időbeli egymásra hangolása határozza meg a teljes feszültségcsökkentő hatást [23] [6].

A vibrációs feszültségcsökkentés időtartamának túlzott növelése nemcsak gazdaságtalan, hanem kedvezőtlen mikrostruktúrális és mechanikai hatásokat is kiválthat, mivel a hosszan fennálló vagy túl nagy amplitúdójú rezgés új lokális maradó feszültségeket generálhat és növelheti a káros mikro deformációk kockázatát. A szakirodalom ugyanakkor igazolja, hogy rövidebb, ismételt VSR-ciklusok azonos hatékonysággal képesek biztosítani a feszültségrelaxációt, mint egyetlen hosszabb kezelés. Biancalana Neto és munkatársai hegesztett csőidomokon végzett vizsgálatai szerint a kettős VSR-kezelés a maradó feszültségek olyan mértékű csökkenését eredményezte, amely nem maradt el a hosszú egyszeri ciklusok hatásától, miközben a keménység, ütőszívósság értékek gyakorlatilag változatlanok maradtak. Ez arra utal, hogy ha egy rezgési ciklus során a feszültségcsökkenés nem teljes, akkor a kezelés biztonságos és hatékony módja nem a rezgési idő túlzott növelése, hanem több egymást követő, kontrollált energiájú vibrációs ciklus alkalmazása, amely elkerüli a túlterhelésből származó károsodásokat és megőrzi az anyag mechanikai integritását [22] [15].

2.2. TVSR technológia kialakulása és kezdeti eredményei

A vibrációs feszültségcsökkentés általában javítja a szerkezeti stabilitást és mérsékli a megmunkálás utáni alakváltozási hajlamot, ugyanakkor hatásfoka erősen anyag- és feszültségeloszlás-függő. Számos vizsgálat rámutatott, hogy a VSR nem minden feszültségkomponensre hat egyformán: egy Al–Mg–Si–Cu ötvözetben például a kompresszív maradó feszültségek ~52,6%-kal csökkentek, míg a húzóirányú komponensek változása 10% alatt maradt, ami jelzi a dinamikus terhelés irányérzékenységét és a lokális képlékenyítési küszöb szerepét a relaxációban. Nagy folyáshatárú acélokban vagy nagy keresztmetszetű szerkezetekben a szobahőmérsékletű vibráció gyakran nem idéz elő elegendő mikroplasztikus deformációt, mivel a rezgésből származó dinamikus feszültségingadozás nem éri el a folyási feltételeket. Ennek következtében a VSR sok esetben csak részleges, aszimmetrikus vagy nehezen reprodukálható stresszoldást biztosít, ami korlátozza önálló alkalmazhatóságát kritikus műszaki területeken [12].

E korlátok vezettek a termikus–rezgéses feszültségcsökkentés (TVSR) kifejlesztéséhez, amely egyesíti a hőkezelés (TSR) és a vibrációs kezelés (VSR) előnyeit. A TVSR lényege, hogy a munkadarabot egy, a szövetszerkezetet még nem károsító hőmérsékleten tartják, miközben kontrollált dinamikus terhelést alkalmaznak. A megemelt hőmérséklet csökkenti a folyáshatárt és

növeli a diszlokációmozgás sebességét, így a vibráció által keltett alternáló feszültségek könnyebben váltanak ki mikroplasztikus átrendeződést, amely a maradó feszültségek gyorsabb és nagyobb térfogatban történő relaxációjához vezet. A szinergikus hatást több anyagrendszeren is igazolták: 7075 alumíniumnál a TVSR 55,9%-os feszültségcsökkenést eredményezett, jóval meghaladva az önálló VSR hatékonyságát. 2219 hegesztett alumíniumban a kombinált kezelés homogenizálta a longitudinális és transzverzális feszültségmezőt, különösen a hőhatásövezetben, felülmúlva a TSR és VSR önálló eredményeit. SiC/Al kompozitoknál pedig a TVSR a mátrix hőre aktivált relaxációs folyamatainak és a vibráció által kiváltott lokális diszlokáció-elmozdulásoknak a kölcsönhatására építve jelentősen nagyobb feszültségcsökkenést biztosított, mint a tisztán vibrációs kezelés. Mindezek alapján a kombinált termikus–rezgéses eljárás olyan termomechanikai állapotot hoz létre, amelyben a plasztikus relaxáció feltételei szélesebb tartományban teljesülnek, így a feszültségcsökkenés gyorsabb, egyenletesebb és reprodukálhatóbb, mint a klasszikus VSR esetén [24] [11].

A TVSR technológia alkalmazása a 2010-es évek közepén jelent meg a vibrációs feszültségcsökkentés továbbfejlesztéseként. Lv és Zhang végezték az első átfogó vizsgálatot, amelyben 7075 alumíniumötvözet lemezeken demonstrálták, hogy a megemelt hőmérsékleten alkalmazott vibráció lényegesen nagyobb stresszrelaxációt eredményez, mint a hagyományos VSR. Méréseik szerint a TVSR-rel 55,9% maradó feszültségcsökkenés érhető el, míg ugyanazon körülmények között a VSR mindössze 13,4%-kal csökkent, vagyis a kombinált eljárás mintegy 40–45%-kal nagyobb hatékonyságot biztosított.

A különbség oka, hogy a 175 °C-ra történő előmelegítés átmenetileg csökkenti a 7075-T6 folyáshatárát, így a rezgés által keltett dinamikus feszültségingadozás eléri a mikroplaszticitás küszöbét, amelyet szobahőmérsékleten az anyag nagy szilárdsága miatt a VSR nem képes kiváltani. A TVSR ezért nagyobb térfogatban aktiválja a diszlokációmozgást és hatékonyabban rendezi át a maradó feszültségmezőt, ami a módszer lényegesen magasabb stresszcsökkentő teljesítményét magyarázza [25] [11].

A TVSR első vizsgálatai egyértelműen igazolták, hogy a módszer különösen hatékony a nagy szilárdságú alumíniumötvözetekben és hegesztett alumínium panelekben. Chen és munkatársai kimutatták, hogy míg a hőkezelés csak részlegesen, elsősorban a varratra merőlegesen csökkentette a 2219-es ötvözetben jelentkező csúcshőfeszültséget, addig a TVSR mindkét irányban egyenletesebb és nagyobb mértékű feszültségcsökkenést eredményezett. A módszer később más szerkezeteken is bevált: Li és kollégái 50 mm vastag DH36 acélhegesztéseknél találták hatásosnak a termikus és vibrációs hatások kombinációját, míg Wu és társai a 2219 alumíniumötvözet gyűrűin különböző előmelegítési feltételek mellett is egyértelmű előnyt mutattak ki. A TVSR a vékonyfalú, repülőgépipari alkatrészeknél a megmunkálás utáni alakváltozás csökkenését is elősegíti, ami összhangban áll Xu és munkatársai 7075-ös alumíniumötvözetben végzett vizsgálataival, ahol közel 60%-os deformációcsökkenést értek el TVSR alkalmazásával. A módszer hatékonysága anyagtól függetlenül is megmutatkozik: a különböző kutatások szerint a belső feszültségek akár 55–56%-kal is mérsékelhetők az eredetileg feszültséggel terhelt, kritikus zónákban, ami jóval meghaladja a VSR hatását. Mindezt tovább erősíti, hogy titánötvözetekben is rendkívül hatékonynak bizonyult: a Ti6Al4V ötvözet maradó feszültségeinek több mint 90%-a oldódott fel, a hőkezelésnél több mint négyszer nagyobb hatékonysággal. A különböző anyagokon és geometriai kialakításokon végzett vizsgálatok tehát egybehangzóan arra utalnak, hogy a termikus lágyítás és a dinamikus igénybevétel összehangolt alkalmazása lényegesen egyenletesebb, gyorsabb és az anyagot kevésbé terhelő feszültségcsökkentést biztosít [26] [11].

2.3. A TVSR technológia hőmérsékletfüggő hatékonysága

A termikus–rezgéses feszültségcsökkentés hatásmechanizmusát alapvetően az határozza meg, hogy a megemelt hőmérséklet csökkenti az anyag folyáshatárát, így a vibrációs terhelés kisebb amplitúdó mellett is eléri a mikroplaszticitás küszöbét. Ennek következtében a feszültségrelaxáció nagyobb térfogatban és gyorsabban megy végbe, mint szobahőmérsékleten alkalmazott VSR esetén, ahol a dinamikus igénybevétel gyakran nem elegendő nagy szilárdságú vagy vastag keresztmetszetű anyagokban [12].

A TVSR hőmérsékletfüggő hatását elsőként Lv és Zhang igazolták 7075 alumíniumon, majd Gao és munkatársai részletesen kvantifikálták, a kombinált eljárással elért feszültségcsökkenés

~38,6%-kal haladta meg a VSR, és ~20,4%-kal a TSR hatásfokát azonos körülmények között. A diszlokációsűrűség kimutatható növekedése alátámasztja, hogy a hő és vibráció együttesen jelentősen gyorsítja a rácson belüli átrendeződést [12]. A módszer hatékonysága több alumíniumrendszeren is reprodukálható. 2219 ötvözet hegesztett próbatesteken és nagy átmérőjű gyűrűkön a TVSR-rel elért maximális maradófeszültség-tartomány szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a csak hőkezelt, vagy csak vibrációval kezelt minták esetén, a csúcshőfeszültségek leépülése mindkét irányban egyenletesebbé vált, különösen a hőhatásövezetben [9].

A TVSR különösen nagy hatékonyságot mutat magas szilárdságú ötvözetekben. Ti6Al4V esetén a maradó feszültségek >90%-os redukcióját mérték, amely több mint 4× nagyobb, mint a hagyományos hőkezeléssel elérhető csökkenés, miközben a kezelési hőmérséklet alacsonyabb és az időtartam rövidebb volt. [16]

2.3.1. Alacsony hőmérsékletű tartomány

A TVSR alacsony hőmérséklet-tartományban (≈ 25 °C körül) gyakorlatilag a VSR mechanizmusával azonos módon működik, mivel a hőkomponens termikus aktivációja még nem érvényesül. Ebben a tartományban a rezgés okozta ciklikus dinamikus feszültség elsősorban a pontszerű akadályokhoz rögzült diszlokációszegek kitérését és lokális mikroplaszticitást idézi elő, így a feszültségcsökkenés mértéke a mátrix pillanatnyi folyáshatárához és a dinamikus terhelés amplitúdójához kötött. A csatolt anyagvizsgálatok szerint a tisztán rezgésen alapuló eljárások, még nagy amplitúdón is jellemzően csak a maradó feszültség ~40–50%-át képesek leépíteni, mivel a mátrixban ilyenkor nem indul meg jelentős diffúzió vagy kötéslazulás, és a diszlokációmozgás továbbra is termikusan korlátozott. A TVSR ezen a hőmérsékleten sem mutat érdemi többlethatást, a SiC/Al kompozitban a mátrix mikroszkopikus feszültsége alacsony (≈ 0 MPa körüli), míg a SiC fázis erősen nyomott állapotban van (≈ -480 MPa), ezért a mátrixon belüli relaxációs potenciál kicsi. A mechanikai igénybevétel által termelt hő és a szemcsehatárok lokális aktivációja ekkor még elégtelen a rekristályosodás vagy egyéb szerkezeti átrendeződések megindításához, így sem a mátrix, sem a kompozit szerkezete nem mutat hővezérelt változást. Következésképpen szobahőmérséklet közelében a TVSR hatásosságát kizárólag a dinamikus terhelés határozza meg, és a feszültségcsökkenés nagysága nem lépi túl számottevően a VSR-rel elérhető szintet [23].

2.3.2. Közepes hőmérsékletű tartomány (150–400 °C)

Közepes hőmérsékleten működik leghatékonyabban a TVSR, mert ekkor a hőhatás már kellően aktiválja a diszlokációk mozgását, miközben a vibráció mechanikai instabilitást kelt a szemcsehatárok és a nagy belső feszültségű zónák környezetében. Ilyen tartományban a hő részben felszabadítja a pontszerű akadályokat, a rezgés pedig elősegíti a gyors feszültségcsökkenést, ami a kísérletek szerint Ti6Al4V esetében már ~280–380 °C körül is rendkívül hatékony, 280 °C-on több mint 90%-os maradó feszültségoldást mértek, míg 380 °C-on és 400 MPa dinamikus feszültségnél az SLM-el gyártott Ti6Al4V mintákon 86,76%-os csökkenést értek el, ami 63,63%-kal nagyobb, mint a pusztán rezgéses kezelés hatása, és 76%-kal nagyobb hatékonyságú, mint a hagyományos 580 °C-os hőkezelés, mindezt alacsonyabb hőmérsékleten és rövidebb idő alatt. A mikroszerkezet eközben gyakorlatilag változatlan marad: szemcseméret-növekedés vagy fázisátalakulás nem figyelhető meg, legfeljebb a kis szögű szemcsehatárok aránya nő, ami a diszlokációk intenzív mobilizációjára utal. A mérsékelt magas hőmérséklet ugyan járhat némi kötési relaxációval és ezáltal csekély szilárdságcsökkenéssel, de a gyors és homogén feszültségoldás miatt ez a tartomány adja a TVSR legkedvezőbb hatásfokát [26].

2.3.3. Magas hőmérsékletű tartomány (>400 °C)

Magasabb hőmérsékleten a TVSR hatásmechanizmusát egyre inkább a termikus folyamatok uralják, mivel a hőenergia ekkor már aktiválja a rekristályosodást, a szemcsehatár-átcsúszást és a diffúziós átrendeződéseket. Ezek a folyamatok további, a közepes hőmérsékleteken tapasztaltnál is nagyobb mértékű feszültségcsökkenést tehetnek lehetővé, azonban ezzel párhuzamosan nő a mikrostrukturális kockázat, a szemcsék növekedése, a fázisösszetétel módosulása vagy – különösen acélokban és titánötvözetekben – az oxidáció gyors felerősödése. Utóbbi jól ismert Ti6Al4V esetében, ahol 550 °C felett már jelentős oxidáció indul meg, ezért a TVSR magas hőfokon történő alkalmazása légköri környezetben nem ajánlott. A túl magas hőmérséklet következménye továbbá

a mechanikai tulajdonságok romlása, a rétegrács felpuhulása, a szemcseméret durvulása és a szívósság csökkenése révén a nagyfokú feszültségoldást ridegebb törési viselkedés vagy gyengébb korróziós stabilitás kísérheti. A TVSR ezért a gyakorlatban ritkán lépi túl az anyag átalakulási hőmérsékletének tartományát, és jellemzően a közepes vagy közép-magas hőmérsékleti intervallumban alkalmazzák, ahol a termikus aktiváció már kellően elősegíti a diszlokációk és szemcsehatárok mozgását, ugyanakkor a mikrostruktúra még megőrzi stabilitását. Li és társainak vizsgálatai például kimutatták, hogy ha a hőmérséklet túl magasra emelkedik, a SiC/Al kompozitban a mikroszerkezeti károsodás mértéke nő, miközben a relaxáció hatékonysága már nem arányosan javul. E tartomány felett a TVSR gyakorlatilag a klasszikus hőkezelés viselkedését követi, amelyet a vibráció csupán kismértékű mechanikai hozzájárulással egészít ki. Ennek ára a hosszabb lehűlési idő és a mikrostruktúra kedvezőtlen durvulása, amely miatt a túl magas TVSR-hőmérsékletet általában kerülni kell [23] [26].

2.4. TVSR technológia lehetséges kockázatai és korlátai

A túl magas TVSR-hőmérséklet olyan termikus folyamatokat aktivál, mint a szemcsenövekedés, a kiválások durvulása, a fázisátalakulások és az oxidáció felgyorsulása, amelyek a feszültségcsökkentés mellett már az anyag mechanikai tulajdonságainak romlását okozzák. A csatolt vizsgálat szerint például 6061-T6 alumíniumnál 340 °C-on végzett 1 órás hőregítés ugyan ~60% maradó feszültségcsökkenést eredményezett, de ezzel együtt ~20% szakítószilárdság-csökkenést is kiváltott, ami jól mutatja a magas hőmérsékleten végzett TVSR kettős – részben kedvezőtlen – hatását. Acéloknaál a temperálási tartomány túllépése hasonló módon vezet keménység- és szívósságvesztéshez. További kockázatot jelent, hogy kedvezőtlen hőprofil (gyors lehűtés, nem megfelelő lépcsőzetesség) esetén új hőfeszültségek keletkezhetnek és lokális diszlokáció-felhalmozódás alakulhat ki. Emiatt a TVSR gyakorlati alkalmazása ritkán lépi túl az anyag átalakulási tartományát: a magas hőmérsékletek ugyan gyors feszültségoldást biztosítanak, de a mikrostruktúra tartós károsodása miatt nem tekinthetők biztonságosnak [23].

A rezgéses feszültségcsökkentés önmagában nem rontja az anyag szívósságát: a csatolt vizsgálatok szerint a VSR nem okoz mikrostruktúrális károsodást, nem csökkenti a keménységet vagy a törési szívósságot, és nem indít repedésképződést hegesztett szerkezetekben. A 316L/Q345 próbatesteken a kezelés után is képlékeny, duktilis törési karakter volt megfigyelhető, amelyben a lokális kónusz-kagylós szakadásjelleg változatlanul fennmaradt, a fáradási viselkedésben pedig nem jelentkezett romlás [22].

A TVSR ipari alkalmazásának egyik legnagyobb kockázata a folyamat ismételhetőségének és szabályozhatóságának bizonytalansága, mivel a technológia nem rendelkezik egységesített eljárási előírásokkal, a hő- és vibrációs paramétereket minden szerkezethez egyedileg kell összehangolni. Wiczorowski kiemeli, hogy a vibrációs feszültségcsökkentés ipari terjedését mindmáig a mechanizmus részleges tisztázatlansága és a beavatkozás hatásának nehéz prediktálhatósága korlátozza. Emiatt a TVSR folyamat kontrollja és reprodukálhatósága, különösen nagy méretű, heterogén hegesztett szerkezetek esetén továbbra is korlátozott, ami indokoltá teszi a technológia működési elveinek és paraméterérzékenységének további kutatását [9].

3. Következtetések és kritikai értékelés

A vizsgált szakirodalom alapján egyértelműen megállapítható, hogy a VSR és a TVSR eljárások egymástól alapvetően eltérő, de egymást kiegészítő fizikai mechanizmusokra épülnek, és a maradó feszültségek csökkentésében eltérő hatékonysági spektrumot képviselnek. A kutatás egyik legfontosabb felismerése, hogy a maradó feszültségek relaxációja nem homogén, hanem mindig a lokális diszlokációszerkezet, a geometriai feszültségkoncentrációk, valamint a kezelési paraméterek kölcsönhatásából alakul ki. Ez magyarázza a VSR működésének szelektív jellegét, a vibrációs terhelés csak azokban a zónákban képes mikropaszticitást indukálni, ahol a dinamikus feszültségingadozás a folyáshatár közelébe emeli a rugalmas feszültségösszetevőket. Ebből következik, hogy a módszer természeténél fogva anizotróp, a relaxáció térfogata és mértéke döntően az adott alkatrész modalitásától és feszültségeloszlásától függ. A szakirodalomban közölt eredmények, például az Al-Mg-Si-Cu ötvözetnél mért, 50% feletti kompresszív feszültségcsökkenés és 10% alatti húzófeszültség-csökkenés egyértelműen igazolják ezt a

viselkedést, amely arra utal, hogy a VSR nem tekinthető általános, teljes térfogatra kiterjedő stresszcsökkentési módszernek, hanem inkább egy lokálisan aktiválódó, küszöbjellegű eljárásnak. [20] A TVSR kritikai vizsgálata ezzel szemben azt mutatja, hogy a kombinált termikus és dinamikus aktiváció radikálisan módosítja a relaxáció mikro mechanizmusait. A megemelt hőmérséklet a diszlokációk mobilitását nem lineárisan, hanem termodinamikailag determinált módon növeli, így a vibrációs terhelés olyan anyagtartományokban is mikropasztikus folyamatokat indít el, ahol a VSR önmagában hatástalan maradna. Ennek eredményeként a TVSR-rel elérhető feszültségcsökkenés több anyagban minőségileg eltér a VSR eredményeitől, nem csupán nagyobb mértékű, hanem térfogatában is sokkal homogénebb. A 7075 alumíniumon mért 55,9%-os feszültségcsökkenés, szemben a vibráció önálló alkalmazásával elért 13,4%-kal, jól tükrözi azt a termomechanikai szinergiát, amelyet a hőmozgás és az alternáló terhelés együttesen hoz létre. A hőmérséklet-vezérelt lágyulás következtében a diszlokációsűrűség növekedése és az energiaállapot csökkenése olyan mélységű belső átrendeződést eredményez, amely a VSR-rel összehasonlítva lényegesen stabilabb feszültségeloszlást hoz létre [11].

A TVSR hatékonysága más alumíniumrendszerekben és titánötvözetekben is következetesen igazolt, a 2219 alumínium hegesztett varrataiban mért egyenletes longitudinális és transzverzális csökkenés, valamint a Ti6Al4V ötvözetben dokumentált, 90% feletti relaxáció mind arra utalnak, hogy a kombinált eljárás egy olyan hibrid termodinamikai állapotot hoz létre, amelyben a pasztikus relaxáció lehetősége jóval szélesebb tartományban áll fenn, mint bármely önálló módszernél. Additív gyártású anyagokon, különösen SLM/DMLS Ti6Al4V próbatesteken a TVSR-rel elért ~86%-os feszültségcsökkenés, amely 63%-kal nagyobb a VSR és 76%-kal nagyobb a TSR eredményénél rávilágít arra, hogy a kombinált eljárás hatékonysága nem csupán laboratóriumi környezetben, hanem modern gyártástechnológiák valós ipari környezetében is érvényesül [9] [13].

A kutatás kritikai értékelése tehát arra a megállapításra jut, hogy a VSR és TVSR közötti különbség nem egyszerű teljesítménybeli eltérés, hanem mélyen gyökerező anyagtudományi divergens működésmód. Míg a VSR egy feltételeken alkalmazható, lokális küszöbmechanizmus, addig a TVSR a diszlokációmozgás hőmérsékletfüggő erősítésén keresztül képes a teljes feszültségmező átrendezésére. Ennek következtében a TVSR stabilabb, reprodukálhatóbb és nagyobb térfogati hatásfokú eljárásnak emelkedik ki, amely sok tekintetben meghaladja a klasszikus hőkezelést is.

4. Kihívások és kutatási irányok

A rezgésen alapuló (VSR) és termikus–rezgéses (TVSR) feszültségcsökkentő eljárások jelentős potenciált mutatnak az ipari méretű feszültségmenedzsmentben, ugyanakkor a rendelkezésre álló kutatások alapján több kritikus korlát akadályozza a módszer széleskörű, szabványosított alkalmazását. A legfontosabb kihívás az eljárások anyagfüggő érzékenysége, amely elsősorban a folyáshatár, a mikroszerkezeti állapot, a heterogén belső feszültségmezők és a lokális képlékenyedési küszöb kölcsönhatásából ered. A VSR akkor hatékony, ha a maradó és a dinamikus feszültségek szuperpozíciója eléri vagy meghaladja a lokális 0,2%-os folyáshatárhoz tartozó mikropasztikus küszöböt, ennek hiányában a feszültségrelaxáció nem indul meg. Ez különösen problémás nagy szilárdságú acélok, titánötvözetek vagy vastag keresztmetszetű szerkezetek esetében, ahol a dinamikus terhelésből származó feszültségingadozás nem képes elérni a kritikus értéket.

A módszer másik lényeges korlátja a feszültségkomponensek irányérzékeny viselkedése. Több publikáció rámutatott, hogy egy adott anyagban a kompresszív maradó feszültségek jelentősen (akár 50% felett), míg a húzó komponensek csak marginálisan csökkenthetők. Ez a feszültségmezők heterogenitásából, a geometriai átmenetekben koncentrálódó feszültségcsúcsokból és a nagymértékű anizotrópiából fakad, különösen olyan rendszerekben, mint az additív gyártású (SLM/DMLS) ötvözetek. E korlátok miatt a VSR reprodukálhatósága korlátozott, és a hatás nem minden esetben extrapolálható komplex szerkezetekre.

A TVSR ugyan jelentősen szélesíti az alkalmazhatóságot, de központi korlátját továbbra is az optimális paraméterter meghatározhatatlansága jelenti. A kezelés hatékonysága érzékeny a hőmérsékletre, a hőntartási időre, a rezgés amplitúdójára, frekvenciájára és a gerjesztés irányára. A túl alacsony hőmérséklet nem biztosít elegendő folyáshatár-csökkentést, a túl magas pedig

kedvezőtlen mikrostruktúra-változásokat, szemcsedurvulást, kicsapódási kinetika megváltozást okozhat. A paraméterek közötti optimális tartomány jelenleg anyag- és geometriarendszerenként eltérő, egységesített modell még nem áll rendelkezésre. A TVSR egyik legnagyobb hiányossága továbbá a szabványosított mérési és verifikációs protokollok hiánya, különösen hegesztett, ötvözött és additív gyártású alkatrészek esetében.

A jövőbeli kutatások kiemelt feladata a fizikailag verifikálható, prediktív modellek létrehozása, amelyek képesek pontosan meghatározni a mikropasztikus relaxáció térbeli és időbeli lefutását. A jelenlegi modellek elsősorban egyszerű geometriákra és homogén feszültségmezőkre korlátozódnak, a valós ipari alkatrészek sokszor többretegű, anizotróp vagy hőhatásövezettel rendelkező szerkezetek, amelyekben a rezgés terjedése és a dinamikus feszültségeloszlás nem írható le egyszerű rugalmas–képlékeny közelítésekkel. Kulcskérdés továbbá a frekvencia–amplitúdó–hőmérséklet kölcsönhatásának pontos feltérképezése, különös tekintettel a nagyfrekvenciás (HF-VSR) és kombinált mágneses–mechanikai vibrációt alkalmazó módszerekre, amelyek a közelmúltban ígéretes eredményeket mutattak.

A kutatási irányok között kiemelt szerepet kell kapnia a TVSR additív gyártású anyagokra történő alkalmazásának. Az SLM/DMLS technológiákban a nagy, folyáshatár-közei maradó feszültségek, az anizotrópia és a lokális hőtörténet miatt a TVSR különösen ígéretes, ugyanakkor a mikrostruktúrára gyakorolt hatás és a hosszú távú fáradási viselkedés még nem kellően feltárt. A jövőben szükséges olyan nagyfelbontású röntgendiffrakciós, digitális képanalízises (GOM/ARAMIS) és mikromechanikai teszteléseket alkalmazó vizsgálatok elvégzése, amelyek pontosan feltárják a TVSR mikroszerkezeti következményeit.

Lényeges továbbá a feszültségcsökkentés időbeli stabilitásának vizsgálata. Több tanulmány szerint a rezgésen alapuló relaxáció egy része az első kezelést követő időszakban stabilan megmarad, más esetekben azonban időfüggő visszaalakulás (stress recovery) figyelhető meg, különösen hegesztett szerkezeteknél. A tartósság és a hosszú távú fáradási integritás kérdése ezért kiemelt fontosságú, és a különböző kezelések összehasonlítása csak ezek figyelembevételével tekinthető teljesnek.

Végül, a technológia ipari bevezetéséhez elengedhetetlen a standardizáció, amely jelenleg teljes mértékben hiányzik. Sem a VSR, sem a TVSR nem rendelkezik olyan nemzetközi vagy iparági szabványrendszerrel, amely definiálná a minimálisan szükséges mérési pontokat, a paramétertartományokat, a gerjesztési konfigurációkat vagy az értékelési kritériumokat. Egy ilyen rendszer kidolgozása elengedhetetlen a reprodukálhatóság, a minőségbiztosítás és a kockázatkezelés szempontjából.

5. Konklúzió

A tanulmány összegző értékelése rávilágít arra, hogy a vibrációs és a termikus–rezgéses feszültségcsökkentő eljárások hatékonysága egyértelműen az alkalmazott technológiai paraméterek, elsősorban az időtartam, a frekvencia, a rezgés amplitúdója és a hőmérséklet kölcsönhatásán múlik. A vizsgált eredmények alapján a VSR-rel elérhető relaxációs folyamatok döntően az első kezelési szakaszra koncentrálódnak, ahol a dinamikus feszültségkomponensek már képesek átlépni a lokális mikropaszticitási küszöböt, míg hosszabb kezelési idők esetén a határfok telítődést mutat. A TVSR esetében a mérsékelt hőmérséklet emeli a diszlokációk mobilitását és csökkenti a folyáshatárt, így a vibráció időfüggő hatása sokkal nagyobb anyagterefogatban aktiválódik, és homogénebb feszültségeloszlást eredményez. A hőmérséklet–idő–amplitúdó paramétertér ilyen módon meghatározó szerepet tölt be a pasztikus relaxáció kialakulásában, amelyet az anyag mikroszerkezeti állapota és a kiinduló feszültségeloszlás tovább modulál. A tanulmány következtetése szerint a TVSR a paraméterek megfelelő összehangolásával olyan termomechanikai állapotot teremt, amely minőségileg kedvezőbb és stabilabb feszültségcsökkentést tesz lehetővé, ugyanakkor a módszer ipari alkalmazásához elengedhetetlen a paraméterfüggés pontosabb modellezése és a folyamat szabványosított értékelési keretrendszerének kialakítása.

Irodalomjegyzék

- [1] V. Szabó, I. Hatos és Z. Weltsch, „Understanding and analyzing the effect of residual stresses in direct metal laser sintering through optical deformation measurement,” *Progress in Additive Manufacturing*, 2025. doi:10.1007/s40964-025-01371-3
- [2] V. Szabó és Z. Weltsch, „Full-surface geometric analysis of DMLS-manufactured stainless steel parts after post-processing treatments,” *Results in Engineering*, 2025. doi:10.1016/j.rineng.2025.106084
- [3] M. Daoud, I. Taha, A. Abdelgawad és D. Anjum, „Mapping residual stresses in AlSi10Mg alloy fabricated by powder bed fusion-laser beam method,” *Scientific Reports*, 2025. doi:10.1038/s41598-025-09316-0
- [4] F. Zhao, J. Huang és Z. Zhang, „Welding residual stress prediction with varying cooling rate in phase transformation,” *Optics & Laser Technology*, 2025. doi:10.1016/j.optlastec.2024.112010
- [5] S. Chen, H. Gao, M. Lin, S. Wu és Q. Wu, „Research on process optimization and rapid prediction method of thermal vibration stress relief for 2219 aluminum alloy rings,” *Reviews on advanced materials science*, 2022. doi:10.1515/rams-2022-0028
- [6] L. Gao, Q. Yao, Y. Yang, D. Sun, G. Xu, B. Gu, C. Yang és S. Li, „Effects of Vibratory Stress Relief on Microstructure and Mechanical Properties of Marine Welded Structures,” *Marine Science and Engineering*, 2025. doi:10.3390/jmse13010011
- [7] D. Rao, D. Wang, L. Chen és C. Ni, „The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress,” *International Journal of Fatigue*, 2007. doi:10.1016/j.ijfatigue.2006.02.047
- [8] B. Li, W. Ouyang és Y. Dong, „Investigating the Effects and Mechanisms of Thermal–Vibration–Coupled Stress Relief Treatment on Residual Stress in SiC/Al Composites,” *Metals*, 2024.
- [9] G. Xu és F. Liu, „Effects of High-Frequency Vibration on Residual Stress and Microstructure of Carbon Steel for Marine Structures: Comparative Analysis with Tempering,” *Marine Science and Engineering*, 2025.
- [10] M. Wieczorowski, M. Jakubowicz, L. Marciniak-Podsadna, B. Gapiński, R. Barczewski, B. Jakubek, F. Rogiewicz, C. Jermak és B. Khan, „Experimental Verification of Geometric Changes Caused by the Release of Residual Stresses for Large-Scale Welded Frames,” *Materials*, 2024.
- [11] H. Song, Z. Gao, X. Zhou, Q. Zhang és B. Zhang, „Research on the evolution law and control mechanism of residual stress under vibration stress relief,” *Materials Today Communications*, 2024.
- [12] H. Gao, X. Li, B. Li, Q. Wu, Y. Ma, X. Jian, H. Song és S. Chen, „Residual stress and microstructure of Ti6Al4V treated by thermal-vibratory stress relief process,” *Journal of Materials Research and Technology*, 2022.
- [13] M. Zaeh és G. Branner, „Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting,” *Production Engineering*, 2009.
- [14] G. Xu és F. Liu, „Effects of High-Frequency Vibration on Residual Stress and Microstructure of Carbon Steel for Marine Structures: Comparative Analysis with Tempering,” *Marine Science and Engineering*, 2025.
- [15] D. Serrati, R. Silva, J. Wiesel, D. Cunha, D. de Araújo és L. Vilarinho, „Effects of heat and vibration treatments for welding on residual stresses and mechanical properties,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023.
- [16] S. Chen, J. Ma, H. Gao, Y. Wang és X. Chen, „Research on Residual Stresses and Microstructures of Selective LaserMelted Ti6Al4V Treated by Thermal Vibration Stress Relief,” *Micromachines*, 2023.
- [17] Y. Xu, Z. Shi, B. Li és Z. Zhang, „Effects of TVSR process on the dimensional stability and residual stress of 7075 aluminum alloy parts,” *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 2021.
- [18] S. Chen, Y. Zhang, Q. Wu, H. Gao és D. Yan, „Residual Stress Relief for 2219 Aluminum Alloy Weldments: A Comparative Study on Three Stress Relief Methods,” *Metals*, 2019.
- [19] G. Huang és B. Li, „The Combined Magnetic-Vibration Stress Relief,” *Results in Physics*, 2023.
- [20] J. Schubnell, E. Carl, M. Farajian és H. Eslami, „Residual stress relaxation in HFMI-treated fillet welds after single overload peaks,” *Welding in the World*, 2020.

- [21] T. Lv és Y. Zhang, „A combined method of thermal and vibratory stress relief,” *Journal of Vibroengineering*, 2015.
- [22] M. Vardanjani és S. Safavi, „Comparison of the thermal and vibrational stress relief methods in terms of mechanical and metallurgical aspects of rolled AA2024 specimens,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2024.
- [23] H. Servak, M. Vardanjani és S. Yousefzadeh, „Analysis of the effect of vibrational stress relief process parameters on 2024Aluminium alloy,” *Heliyon*, 2024.
- [24] V. Szabó és K. Kun, „Laser sintering of metal powders: failure analysis and implementation of solutions for aluminium and stainless steel parts,” *Materials Research Express*, 2024.
- [25] H. Gao, S. Wu, Q. Wu, B. Li, Z. Gao, Y. Zhang és S. Mo, „Experimental and simulation investigation on thermal-vibratory stress relief process for 7075 aluminium alloy,” *Materials and Design*, 2020.
- [26] D. Serranti, R. Silva, D. Souza, J. Wiezel, D. Cunha, D. Araújo és L. Vilarinho, „Variation of the vibrational treatment on mechanical properties and weld residual stress,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024.