



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

GYŐRY TAMÁS

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

POLIAMIDOK ÉS POLIAMID MÁTRIXÚ KOMPOZITOK

ULTRAHANGOS HEGESZTÉSE

Témavezető:

Dr. Suplicz András

egyetemi docens

Konzulens:

Széplaki Péter

doktorandusz

BUDAPEST, 2023

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Suplicz Andrásnak és konzulensemnek, Széplaki Péternek, hogy segítettek a kutatásomban. Bartók Dávidnak a lapka próbatestek fröccsöntéséért. Pinke Balázs Gábornak a DSC mérésben való segítségéért.

Köszönöttem tartozom a családomnak is, amiért támogattak engem az elmúlt 5 év folyamán. Köszönöm a mennyasszonyomnak, Emesének is, aki a bátorítás mellett szakmai tanácsokkal is ellátott. Végül, de nem utolsó sorban köszönöm Istennek.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	ii
Jelölések jegyzéke	v
1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1. Polimerek hegeszthetősége	3
2.1.1. <i>Technológiák bemutatása</i>	3
2.1.2. <i>Ultrahangos hegesztés</i>	6
2.1.3. <i>Poliamid 6 kompozit ultrahangos hegesztése</i>	7
2.2. Poliamid polimerizációja	11
2.3. T-RTM technológia	13
2.3.1. <i>Gyártási paraméterek</i>	15
2.3.2. <i>T-RTM technológiával készített kompozitok</i>	18
2.4. Irodalmi összefoglaló, kritikai elemzés	20
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	21
3.1. Felhasznált alapanyagok	21
3.1.1. <i>Kaprolaktám</i>	21
3.1.2. <i>Erősítőanyag</i>	21
3.1.3. <i>Aktivátor és iniciátor</i>	21

3.2.	Alkalmazott berendezések.....	22
3.3.	Vizsgálati módszerek	24
4.	Kísérleti/fejlesztési rész	26
4.1.	Próbatestek gyártása	26
4.2.	Hegesztési paraméterek meghatározása	28
4.2.1.	<i>Fröccsöntött próbatestek hegesztése</i>	<i>29</i>
4.2.2.	<i>Összehesztett fröccsöntött próbatestek szakítóvizsgálata.....</i>	<i>30</i>
4.3.	T-RTM-mel gyártott próbatestek vizsgálata	33
4.3.1.	<i>Próbatestek hegesztése</i>	<i>33</i>
4.3.2.	<i>Nyíróvizsgálat.....</i>	<i>34</i>
4.3.3.	<i>Optikai mikroszkóp.....</i>	<i>38</i>
4.3.4.	<i>Pásztázó elektronmikroszkópi vizsgálát</i>	<i>43</i>
4.3.5.	<i>Differenciál pásztázó kalorimetria.....</i>	<i>45</i>
5.	ÖSSZEFOGLALÁS	47
5.1.	További megoldásra váró feladatok	48
6.	Felhasznált források.....	49
7.	Mellékletek	54

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
T_g	Üvegesedési átmenet hőmérséklete (glass transition temperature)	°C
T_m	Olvadási hőmérséklet (melting temperature)	°C

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
CT	Komputertomográfia
DSC	Differenciál Páztázó Kalorimetria (Differential Scanning Calorimetry)
IMC	In-Mold Coating
PA	Poliamid
PA6	Poliamid 6
PA66	Poliamid 66
PBT	Polibutilén teraftalát
PCL	Polikaprolakton
PE	Polietilén
PLA	Politejsav
PLLA	Poli(-l-tejsav)
PP	Polipropilén
PPS	Polifenilén szulfid
PVC	Polivinil-klorid
RTM	Resin Transfer Molding
TGA	Termogravimetriás Analízis
T-RTM	Thermoplastic Resin Transfer Molding

1. BEVEZETÉS

A hőre lágyuló kompozitok, szemben a térhálós mátrixú társaikkal, gyártásuk után is megolvaszthatóak és tovább formálhatóak, valamint egymással hegesztési eljárással összecsatlakoztathatóak. Ezen tulajdonságuk miatt előszeretettel alkalmazzák őket különböző iparágakban, mint például autó-, repülőgép-, valamint tengerészeti iparban. Kompozitok hegesztésére több technológia is alkalmazható, ilyenek például a kavaró dörzshegesztés vagy a lézerhegesztés. Kutatásomban az ultrahangos hegesztést fogom alkalmazni hőre lágyuló kompozitok hegesztésére. Az ultrahangos hegesztési technológia számos előnnyel jár, mint például a kedvező ár, kis ciklusidő és az energiahatékony működés. A technológia 20-40 kHz-es frekvenciájú ultrahanggal gerjeszt kis amplitúdójú (20-60 μm) mechanikai rezgéseket. A rezgések hatására megolvad a hegesztendő polimerek határfelülete, amely a molekulaláncok diffúzióját okozza [1, 2].

RTM (Resin Transfer Molding) módszerrel korábban nem volt lehetséges a termoplasztikus polimer mátrixú kompozitok gyártása a nagy viszkozitásuk miatt. Ezt azonban a technológiák folyamatos fejlődésének köszönhetően a 2010-es évek közepére sikerült kiküszöbölni és megjelent az RTM termoplasztikus változata, a T-RTM (Thermoplastic Resin Transfer Molding) technológia. Az eljárás során, miután a szerszámba helyezik az előkészített erősítő struktúrát, alacsony viszkozitású reaktív monomerből és oligomerből, illetve katalizátorból és aktivátorból álló keveréket fecskendeznek be a zárt szerszámba. A monomer poliamid 6 (PA6) esetében az ϵ -kaprolaktám. Az aktivátor segít a reakció elindításában, a katalizátor pedig a folyamathoz szükséges energiaigényt biztosítja. A szerszámban ezután emelt hőmérsékleten (150-180 $^{\circ}\text{C}$) a monomer anionos gyűrűfelnýtásos polimerizációjával polimerizálódik és in-situ módon létrejön a termoplasztikus polimer mátrixú kompozit termék. A technológiával hosszúszálas kompozit alkatrészek hozhatóak létre, amelyek száltartalma a 60 %-ot is elérheti [3, 4].

Kutatásom során T-RTM eljárással készült kompozitok hegeszthetőségét vizsgálom. Ehhez T-RTM eljárással készítek négy- és kétrétegű kompozitokat, valamint PA6 próbatesteket. Emellett fröccsöntéssel is készítek PA6 mintákat. Ezeket több hegesztési paraméteren is megvizsgálom és keresem melyik beállítással tudom a legnagyobb szilárdságú kötéseket létrehozni.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalmi áttekintésben bemutatom az ultrahangos hegesztés technológiát és a poliamid mátrixú kompozitok ultrahangos hegeszthetőségét. Ezután rövid áttekintést teszek a poliamid polimerizációjáról is. Végezetül ismertetem a T-RTM gyártástechnológiát, ezen belül kitérek a gyártási paraméterek terméktulajdonságra kifejtett hatására és bemutatok néhány megvalósított példát is.

2.1. Polimerek hegeszthetősége

A termoplasztikus kompozitok, szemben a hőre nem lágyulókkal, a gyártásuk után megolvaszthatóak és tovább formálhatóak, valamint egymással hegesztéssel összecsatlakoztathatóak. Ezen tulajdonságuk miatt előszeretettel alkalmazzák őket különböző iparágakban, mint például autó-, repülőgép-, valamint tengerészeti iparban [1]. Polimerek hegesztése során az egyik polimerben a láncok kellően mozgékonyá válnak ahhoz, hogy a másik anyag láncjaival összegabalyodjanak. Ehhez azonban kellően magas hőmérséklet szükséges, ami amorf polimereknél az üvegesedési hőmérsékletet (T_g), részben kristályos polimereknél pedig az olvadási hőmérsékletet (T_m) jelenti [5]. A jó minőségű varrat létrejöttéhez ezen kívül megfelelő nyomás és idő szükséges [6].

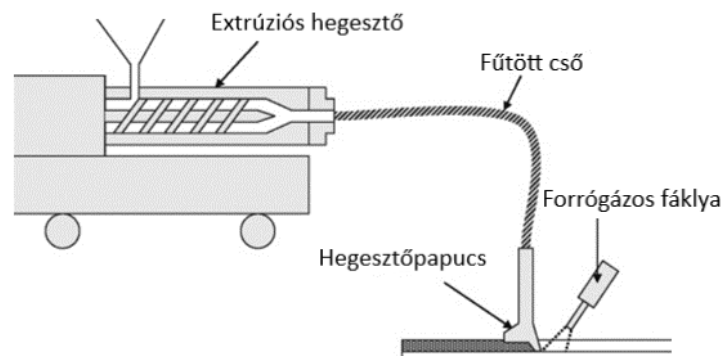
2.1.1. Technológiák bemutatása

A polimerekhez használt hegesztési technológiákat a hőátadásuk módja szerint három kategóriába sorolhatjuk: hővezetéses, sugárzásos és a mechanikai súrlódásos. A hővezetéses technológiák közé tartozik a forrógázos hegesztés, a tükrhegesztés és a forrógázos extrúziós hegesztés [7]. A forrógázos hegesztés egy olcsó és könnyen használható technológia. Termoplasztikus polimerek javítására és összekapcsolására használják, mint például a polipropilén (PP), polivinil-klorid (PVC) és a polietilén (PE). Az eljárás során a hozaganyagot és az összehegesztendő területet forró gázzal melegítik fel. Hátránya, hogy a gáz nem oszlik el egyenletesen és ez oxidációt, illetve degradációt okoz a magasabb hőmérsékletű területeken, az alacsonyabbakon pedig nem jön létre megfelelő minőségű varrat [8].

A tükrhegesztés vagy másnéven fűtőelemes tompahegesztés során az összehegesztendő kivant darabokat a fűtött szerszámmal (hegesztőtükör) összeérintve tartják nyomás alatt.

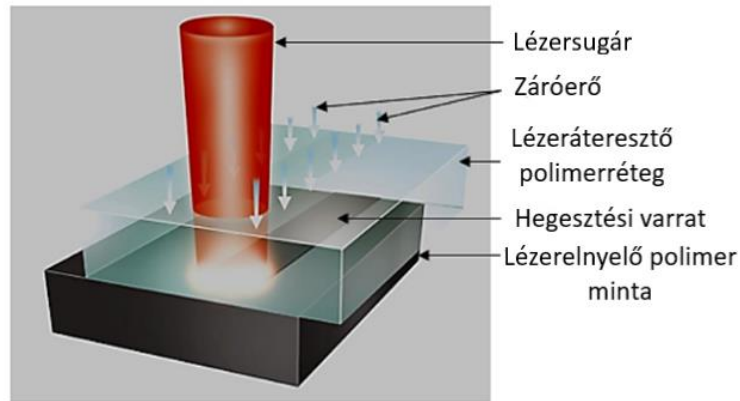
Gyakran használják műanyag csövek vagy járművek hátsó lámpájának hegesztésére. A technológia nagy előnye, hogy bonyolult geometriákhoz is jól alkalmazható [9].

A forrógázos extrúziós hegesztést előszeretettel alkalmazzák membránok vízszigetelésére és műanyag alkatrészek készítésére. A hegesztés során először a hegesztendő felületeket felhevítik, majd hozaganyagot extrudálnak a kívánt felületre (1. ábra) [10].



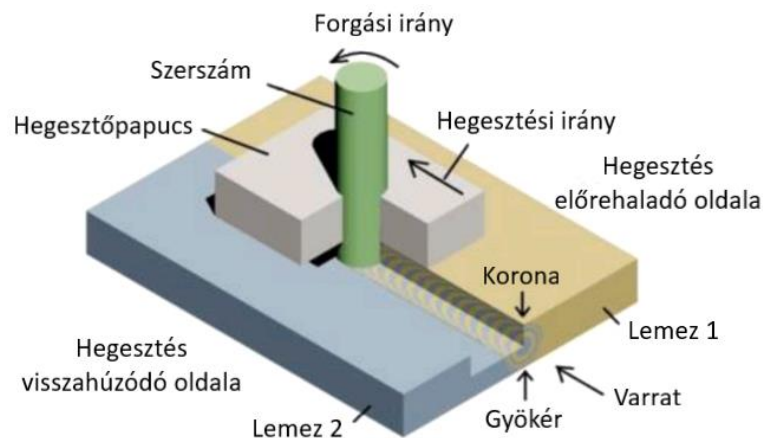
1. ábra: Forrógázos extrúziós hegesztés sematikus ábrája [11]

A sugárzásos hegesztés során az energiaforrásból kibocsátott sugárzás a hegesztendő felületre jutva elnyelődik és megolvasztja az ott lévő anyagot. A sugárzásos hegesztési technológiák közül a legelterjedtebb módszer műanyagok és kompozitok hegesztésére a lézerhegesztés [7]. A lézersugaras hegesztési módszereket már az 1970-es évek óta használják, ezek közül a lézersugaras transzmissziós hegesztés a legelterjedtebb. Lézersugaras transzmissziós hegesztés során az egymást fedő polimer alkatrészeket erővel nyomják össze és lézersugarat irányítanak rájuk. A felső átlátszó darab a lézersugarat továbbítja, az alsó pedig elnyeli. Az átengedett lézer mennyisége az alkatrész anyagának átlátszóságától is függ. Az elnyelt lézersugár az alsó polimerben a polimerláncok vibrációját okozza, ami az anyag felhevüléséhez vezet. Az így létrejött hő ezután az áttetsző elemre is átterjed és ennek következtében mind a kettő tágulni kezd (2. ábra). A technológia használatával csak a kívánt helyen jön létre polimer ömledék, ezzel a használt energia minimalizálható. Az eljárással nagyméretű, könnyen reprodukálható, esztétikus megjelenésű, légmentes varratok hozhatóak létre. Hátránya, hogy a hegesztéshez használt berendezés igen költséges. A hegesztési eljárást többek között csomagoló-, textil-, elektronikai- és az autóiiparban, valamint az egészségügyben alkalmazzák [12].



2. ábra: A lézersugaras transzmissziós hegesztés sematikus ábrája [12]

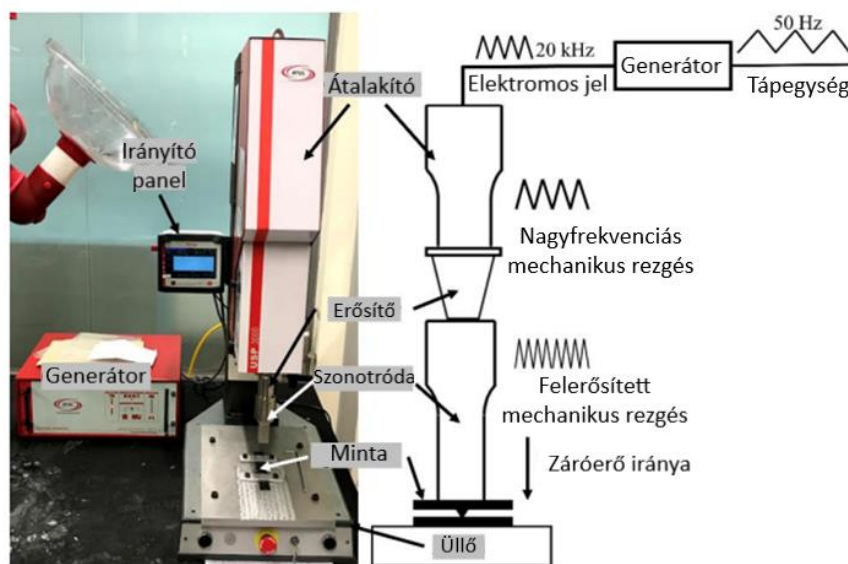
A mechanikai súrlódáson alapuló technológiák nem igényelnek külső hőforrást. A hegesztéshez szükséges energiát az egymáson súrlódó felületek hőjéből nyerik [7]. Az ultrahangos hegesztés mellett súrlódáson alapuló hegesztési technológiák közé tartozik a lineáris dörzshegesztés. A módszert már az 1990 években is használták alumíniumok, polimerek, erősített polimerek stb. hegesztésére. Hegesztés során az összehegesztendő darabokat befogják, majd a hegesztőszerszámot az alkatrészekhez nyomják, ami forgómozgásával a súrlódásnak köszönhetően a hegesztéshez kívánt hőmérsékletet teremt meg. A hegesztés az olvadási hőmérséklet alatt, lágy állapotban megy végbe. A technológiával jó minőségű varratok készíthetők minimális hegesztési hibával, hozaganyag hozzáadása nélkül. Az eljárást gyakran alkalmazzák autóiiparban, hajóépítéshez vagy repülőgépgyártásban [13]. A gép sematikus ábrája a 3. ábrán tekinthető meg.



3. ábra: A lineáris dörzshegesztés sematikus ábrája [13]

2.1.2. Ultrahangos hegesztés

Az ultrahangos hegesztést a kedvező ára, energia hatékony működése és kis ciklusideje miatt előszeretettel használják többek között termoplasztikus polimer kompozitok hegesztésére [2]. Mindezek mellett a kötés létrejöttéhez nem szükséges hozaganyagot használni, felületi károsító hatása is minimális. Az eljárás legfőbb hátránya, hogy körülbelül 3 mm-nél vastagabb varratok készítésére nem alkalmas [14]. A technológia 20-40 kHz-es frekvenciájú ultrahanggal gerjeszt kis amplitúdójú (20-60 μm) mechanikai rezgéseket. A rezgések hatására megolvad a polimer, amely a felületen a láncok diffúzióját okozza. A hegesztés nyomás (1-5 MPa) alatt történik [2, 15]. A hegesztési idő 0,1 és 2,0 másodperc között szokott alakulni. A hegesztett varrat minőségét a felsorolt paraméterek mellett a szonotróda geometriája is befolyásolja [15]. Az ultrahangos hegesztőgép részei a 4. ábrán láthatóak.



4. ábra: Az ultrahangos hegesztő sematikus ábrája [14]

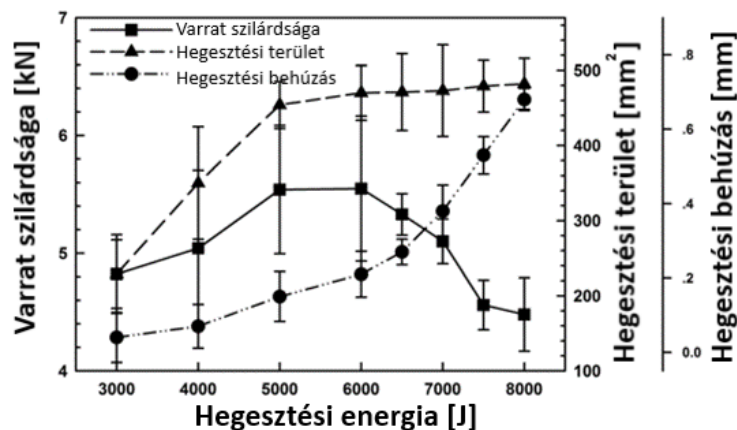
Az ultrahangos rezgéseket a generátor hozza létre a hálózati 50-60 Hz-es feszültség segítségével. A konverterben (rezgés átalakító) elhelyezkedő piezoelektromos anyagok periodikusan kitágulnak és összehúzódnak, ennek hatására mechanikai rezgés jön létre. A rezgéseket a booster erősíti fel, azaz növeli vagy csökkenti a rezgés amplitúdóját. A szonotróda közli a vibrációt a munkadarabokkal, valamint összeszorító erőt gyakorol rájuk. A szonotróda geometriája nagy szerepet játszik a rezgések átadásában. Anyaga általában alumínium vagy titán szokott lenni. A hegesztő asztal (üllő) fogja fel a rezgéseket és tartja a hegesztendő

alkatrészeket. A technológiát leginkább polimer fóliák és lemezek hegesztésére használják [14, 16].

2.1.3. Poliamid 6 kompozit ultrahangos hegesztése

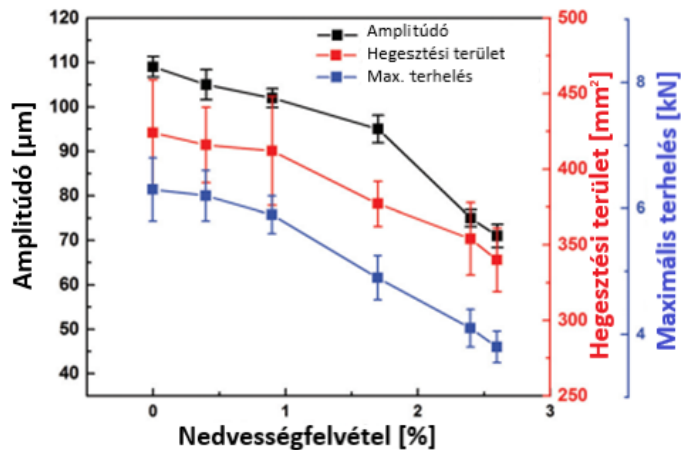
A kutatásomban poliamid 6 kompozitok ultrahangos hegesztését fogom vizsgálni. A következőkben más kutatók által használt hegesztési paramétereket és az ezekhez tartozó eredményeket fogom bemutatni.

Zhi és társai [17] 4 mm vastagságú szénzálás PA66 (poliamid 66) kompozitok ultrahangos hegesztését vizsgálták. Az előgyártmányokat fröccsöntéssel készítették el, amihez 2 mm hosszúságú szénzálakat használtak. A száltartalom 30 m% volt. A hegesztés során az amplitúdó 25 μm , a frekvencia 20 kHz, a hegesztési erő 300 N volt, a hegesztési energiát pedig 3000 és 8000 J között változtatták (5. ábra).



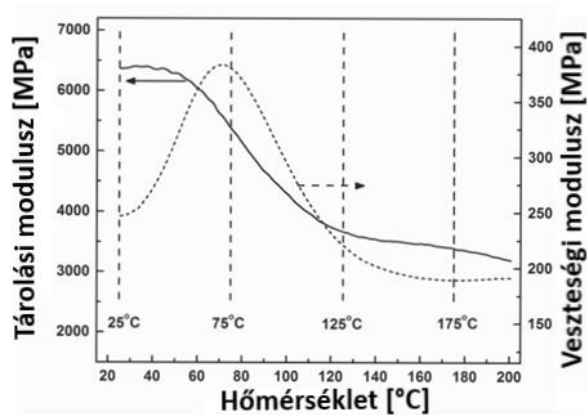
5. ábra: A hegesztési energia hatása a különböző tulajdonságokra [17]

Látható, hogy a varrat mérete 5000 J hegesztési energia felett nem nő jelentősen. A varrat szilárdsága pedig 5000-6000 J környékén éri el a maximumot, ezután csökkenés figyelhető meg. Zhi és társai [18] egy másik kutatás során a hegesztés során jelenlévő nedvesség hatását vizsgálták. Ehhez 30 m% száltartalmú szénzálás PA66 mátrixú kompozitot fröccsöntöttek, amit ultrahangos módszerrel hegesztettek össze. Ehhez 138x38x2,3 mm-es próbatesteket fröccsöntöttek 2 mm hosszú szálakkal. A próbatestek egymást 25 mm hosszan fedték. A hegesztéshez beállított amplitúdó 25 μm , a frekvencia 20 kHz, a hegesztési erő 300 N, a hegesztési energia 3000 J volt. A varrat erőssége, valamint a varrat mérete jelentősen csökkent 1 tf% víz felett (6. ábra).



6. ábra: A víz mennyiségének hatása a különböző tulajdonságokra [18]

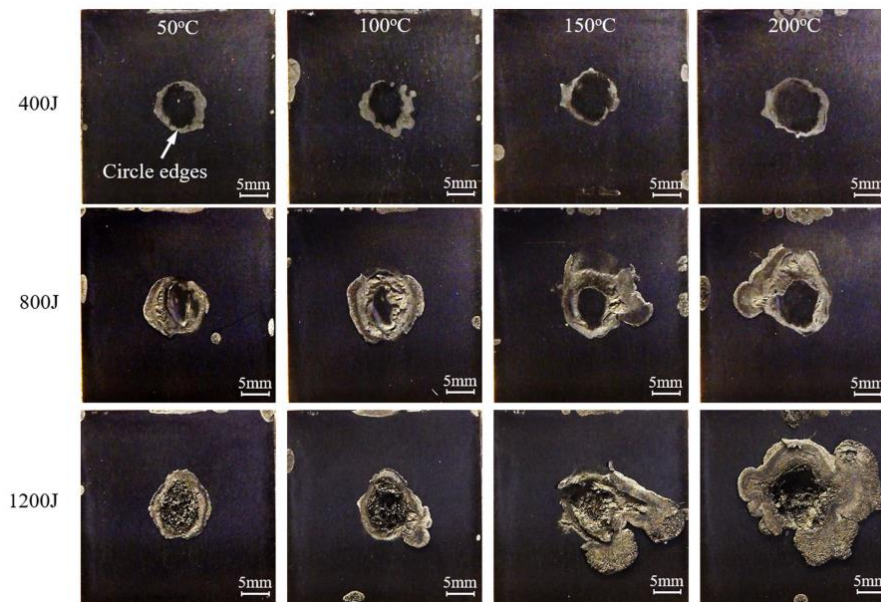
Zhi és kutatótársai [19] vizsgálták az előmelegítés hatásait ultrahangos kompozit hegesztésénél. Az előgyártmányok hasonlóan az eddigiekhez, 2 mm hosszú szénzállal töltött PA66 fröccsöntésével készültek. A próbatestek mérete 132x38x4 mm volt, ezek 25 mm hosszán fedték egymást. A hegesztéshez a következő paramétereket használták: az amplitúdó 25 µm, a frekvencia 20 kHz, a maximális hegesztési nyomás 37 MPa volt. Eredményeik azt mutatták, hogy az előmelegítés hatása a húzószilárdság esetén minimális volt, míg a fáradási szilárdságot jelentősen növelte 80 °C előmelegítési hőmérsékletig, ezután csökkenés figyelhető meg. Míg a tárolási modulus a hőmérséklet növelésével csökkent (7. ábra).



7. ábra: Tárolási és veszteségi modulus az előmelegítés függvényében [19]

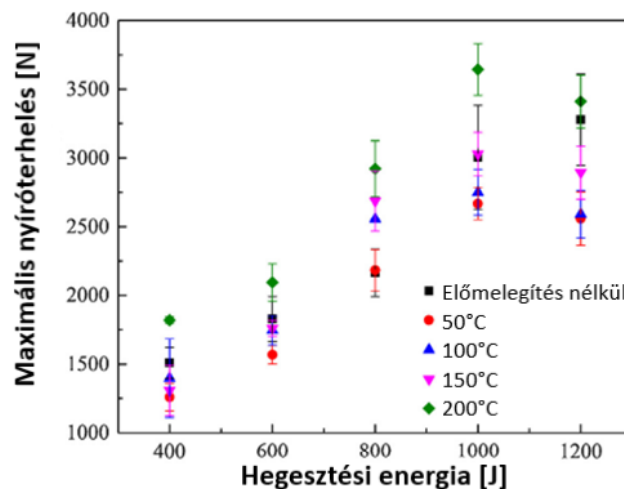
Wang és kollégái [20] az ultrahangos hegesztés előtti előmelegítés hatásait tanulmányozta különböző hőmérsékleteken. Az előgyártmányok fröccsöntéssel készültek 250 µm hosszú szénzállal és PA6 használatával. A próbatestek mérete 38x127x3 mm volt. A hegesztési erő 200 N-ra, az amplitúdó 35 µm-re és a frekvencia 20 kHz-re lett beállítva. 5 hegesztési energiát

hasonlítottak össze (400 J, 600 J, 800 J, 1000 J, 1200 J), 4 hőmérsékleten (50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C). A hegesztési töretfelületek a 8. ábrán tekinthetők meg.



8. ábra: Varratok különböző hegesztési energia és előmelegítés mellett [20]

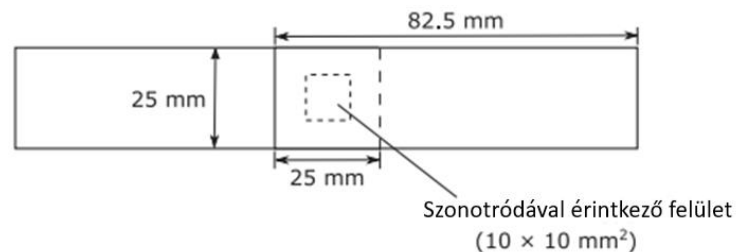
A legnagyobb varrat méretet 800 J hegesztési energia és 200 °C mellett sikerült elérni. A legnagyobb nyíróterhelést az 1000 J hegesztési energiával hegesztett darabok bírták ki.



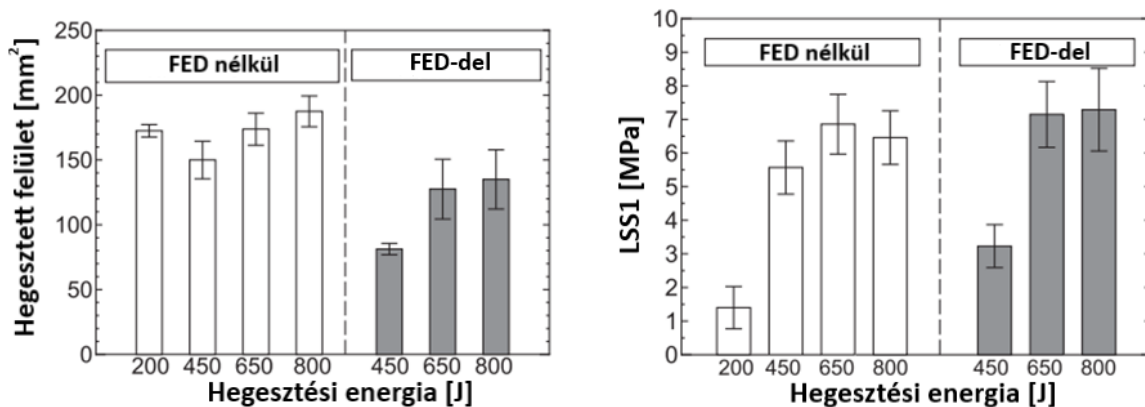
9. ábra: A nyíróigénybevétel a hegesztési energia függvényében [20]

Az 1200 J-on hegesztettek már valamivel rosszabb mechanikai tulajdonsággal rendelkeznek. Ennek okát nem taglalták. Gao és társai [21] 4 mm vastag szénszálas poliamid 66 mátrixú kompozit ultrahangos hegesztését vizsgálták. A fröccsöntött próbatestekhez 2 mm hosszúságú

szénszálat használtak. A fröccsöntés előtt a kompozit mindkét komponensét 3 órán keresztül 80 °C-on szárítószekrényben szárították. A hegesztési idő 1,3 – 3,3 s közé esett, a hegesztési feszültség 0,13 – 0,18 MPa között volt, az amplitúdó 25 µm-re, a frekvencia pedig 20 kHz-re lett beállítva. A legerősebb kötést 2,1 és 2,5 s hegesztési idő és 0,17 MPa hegesztési erőnél sikerült elérniük, amik 5,8 kN terhelésnél szakadtak el. Goto és kutatótársai [22] szénszálas PA6 mátrixú prepregek ultrahangos hegesztését vizsgálták. A rétegek keresztirányú elrendezésben $[0_2/90_2/0_2/90_2]_s$ voltak lerakva. A hegesztéshez egy 10x10 mm keresztmetszetű szonotródát használtak (10. ábra), valamint vizsgálták milyen hatásai vannak a lapos energia direktor használatának a varrat területére és a maximális nyírófeszültségre (11. ábra). A hegesztési energia 200-800 J, a hegesztési erő 400 N, az amplitúdó 90 µm és a frekvencia 15 kHz volt.



10. ábra: A hegesztési elrendezés [22]



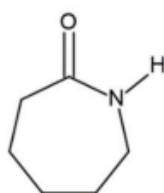
11. ábra: Varrat mérete (bal) és nyíróvizsgálat (jobb) eredménye keresztirányú elrendezésnél [22]

A legnagyobb varrat felületet és a legnagyobb nyírófeszültséget 800 J-os hegesztési energián sikerült elérni. Itt már a hegesztésnél füst is megjelent, ami a túlmelegedés miatt a próbatest kilágyulását okozta. Ez általában rosszabb hajlító merevségű varratot eredményez, mert a próbatest nem nyeli el teljesen a hegesztésnél fellépő energiát.

2.2. Poliamid polimerizációja

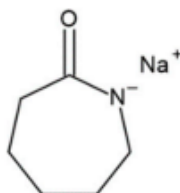
A szintetikus poliamidok már több évtizede jelen vannak a mindennapi életünkben, mégis jelennek meg újabb és újabb használati módjaik [23]. Alkalmazzák őket az élet több területén, többek között elektronikai vagy autópárban rövid üvegszál erősítésű kompozit fröccsöntéséhez. Az elmúlt években többek között a T-RTM technológiával történő gyártás területén készültek jelentős kutatások. A poliamid 6-ot leginkább az ϵ -kaprolaktám ($C_6H_{11}ON$) monomer (12. ábra) anionos gyűrűfelnyitások polimerizációjával hozzák létre [24, 25]. A gyűrűfelnyitások polimerizáció előnye, hogy nagy molekulatömegű termák hozható létre [4].

Az ϵ -kaprolaktámot már a 19. században ismerték, azonban csak 1938-ban fedezték fel, hogy PA6 gyártására is használható. Azóta a kaprolaktám az iparban az egyik legfontosabb laktámmá vált. Sűrűsége $1,014 \text{ g/cm}^3$, olvadási hőmérséklete $69 \text{ }^\circ\text{C}$, forrási hőmérséklete pedig $268 \text{ }^\circ\text{C}$ [24].



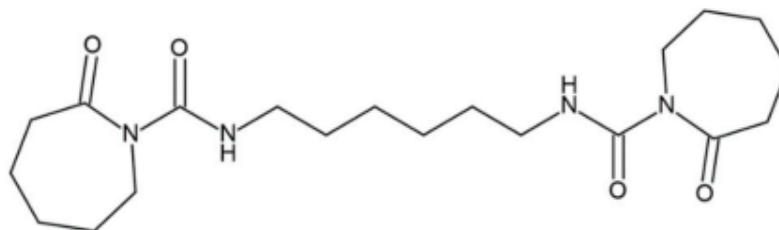
12. ábra: ϵ -kaprolaktám monomer felépítése [26]

Ezekhez különböző katalizátorokat és aktivátorokat adnak, amelyek a reakció beindításához és szabályozásához szükségesek [23, 24]. A katalizátor leggyakrabban a kaprolaktám egy magnézium-, vagy nátrium sója szokott lenni, de lehet még alkálifémet vagy fémhidridet is használni [24, 4] (13. ábra). Ezek emelt hőmérsékleten disszociálnak és anionos laktámmal hoznak létre [4].



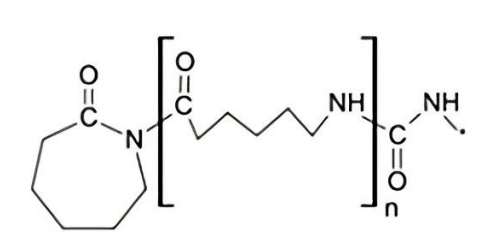
13. ábra: A kaprolaktám nátrium sójának szerkezete [26]

Aktivatorként leggyakrabban savkloridot vagy olyan molekulát alkalmaznak, ami képes imid csoportot létrehozni laktám monomerrel [4]. Ilyen lehet például a kaprolaktámmal blokkolt diizocianát (14. ábra) [24].



14. ábra: A hexametilén-1,6-diizocianát (HDI) struktúrája [26]

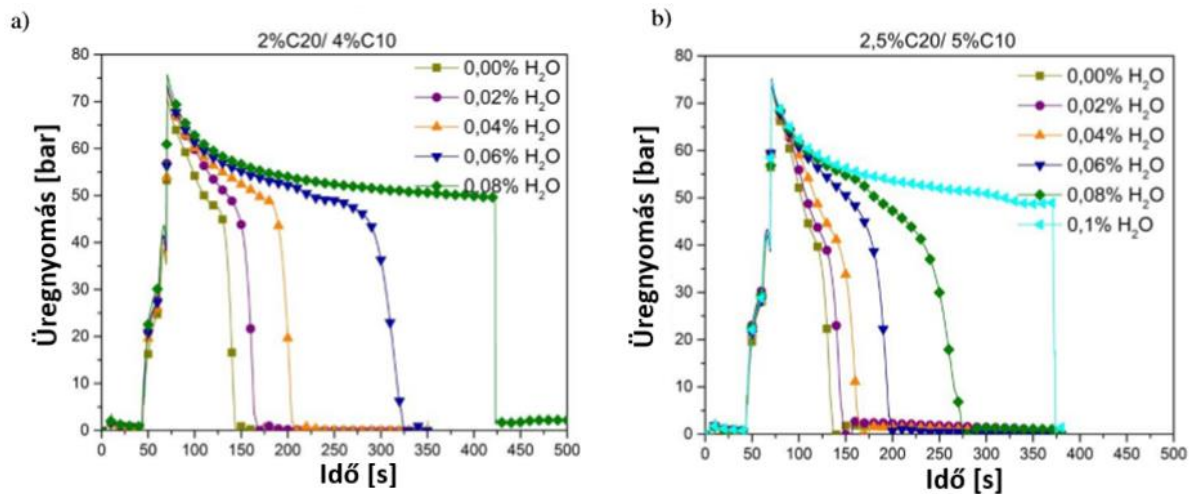
A reakció véghezvihető melléktermékek keletkezése nélkül. A monomer megújuló erőforrások segítségével is előállítható és maga a poliamid 6 mechanikus és kémiai úton is újrahasznosítható. Utóbbival visszanyerhetjük az eredeti monomert [27]. Az elkészült PA6 ismétlődő egységének felépítése a 15. ábrán tekinthető meg.



15. ábra: PA6 ismétlődő egyége [4]

Az ϵ -kaprolaktám polimerizációja érzékeny a vízre, mivel a nedvesség inhibitorként viselkedik a polimerizáció során [24, 26]. Az inhibitorok beavatkoznak a kémiai reakcióba és lassítják a folyamatot. A polimerizáció közben fellépő problémák megelőzése érdekében a mátrixszal kapcsolatba kerülő anyagokat szárazon kell tartani, ez 200 ppm alatti víztartalmat jelent [26, 28]. A víz jelenléte a polimerizáció során a monomer átalakulási hányad és a molekulatömeg csökkenéséhez vezet [29]. Gyártás során a formaüregben lévő nyomás csökkenését a zsugorodás idézi elő, ami a krisztallizáció és a polimerizáció során lép fel. Az üregben lévő nyomásból a polimerizáció idejére lehet következtetni. A reaktív ömledékben lévő víz nagy mértékben befolyásolja az üregben lévő nyomáslefutást is. A víz mennyiségének 0,02 %-ra növelésével a polimerizáció ideje közel megkétszereződik 1 % aktivátor és 2 %

katalizátor esetén. Hasonló folyamat figyelhető meg 2,5 % aktivátor és 5 % katalizátor hozzáadásával is (16. ábra) [28].



16. ábra: Formaüreg nyomása az idő függvényében 2 % aktivátor és 4 % katalizátor (a), illetve 2,5 % aktivátor és 5 % katalizátor esetén [28]

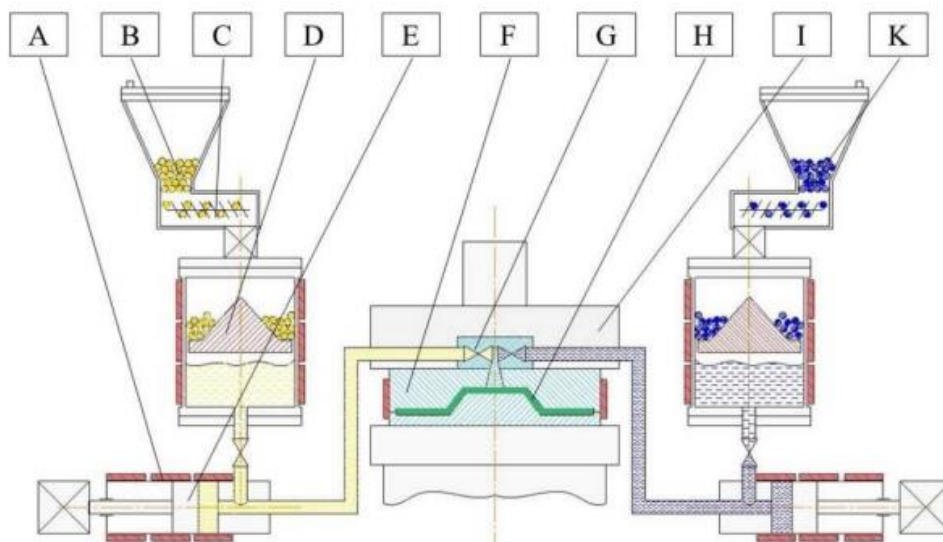
A T-RTM-mel gyártott poliamid mátrixú termoplasztikus kompozitok mellett megjelentek a biopolimer alapú kompozitok is. Ilyen gyakran használt mátrix anyagok közé tartozik a PCL (polikaprolakton), PLA (politejsav) és PBT (polibutilén tereftalát) anyagok, az én dolgozatomban azonban kizárólag a poliamid alapú kompozitok viselkedését és gyárthatóságát vizsgálom [30].

2.3. T-RTM technológia

Az RTM (Resin Transfer Molding) technológia a folyékony kompozit öntő technológiák családjába tartozik [3]. A gyártás során alacsony viszkozitású hőre keményedő gyantát fecskendeznek bele egy zárt szerszámba, amibe erősítőanyagot helyeztek. A gyanta térhálósodik, majd létrejön a kész termék. Ezzel a technológiával jó felületi minőséget lehet elérni, kis hőmérsékleten és kis nyomáson [31]. Az RTM gyártáshoz általában alumínium szerszámot használnak. A gyártás az erősítőanyag szerszámba való behelyezésével kezdődik. Majd a szerszám záródik, megkezdődik a hőközlés és vákuum alá helyezik a szerszámot. A vákuum hatására a gyanta átítatja az erősítőanyagot. Végezetül a gyanta térhálósodása után a kész termék eltávolítható szerszámról [32]. Ezt a technológiát gyakran alkalmazzák kompozit termékek sorozatgyártásában, mert az alacsony viszkozitású gyanta gyorsan térhálósodik. Hátránya azonban ennek a gyártási módszernek, hogy a térhálós mátrix tulajdonságai miatt a

kész termék alacsony keménységgel és rugalmassággal rendelkezik, valamint az újrahasonítás is nehezen megoldható [33]. A technológia egy korábbi formáját már a '40-es években is használták üvegszálak kompozit hajók gyártására. Majd egészen a '80-as évekig nem volt megfigyelhető jelentős előrelépés, amikor azonban köszönhetően az újabb fejlesztéseknek a gyártástechnológiában a katonai alkalmazás mellett megjelentek az autóiipari és repülőgépi ipari felhasználások is [30].

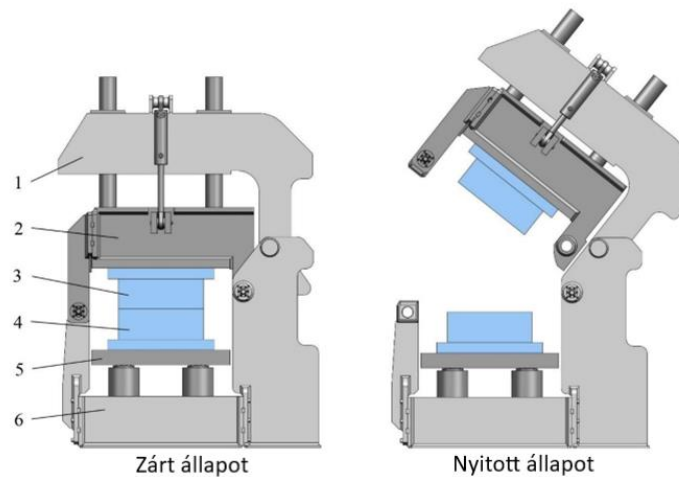
A folyékony kompozit öntő technológiák fejlődésével megjelent a 2010-es évek közepén az RTM technológiának egy termoplasztikus változata, a T-RTM (Thermoplastic Resin Transfer Molding) [3, 30]. Korábban a termoplasztikus polimerek nagy viszkozitása miatt nem volt lehetséges RTM technológiával kompozitokat gyártani belőlük. Ezt a problémát azonban sikerült kiküszöbölni [34]. A gyártás során alacsony viszkozitású (<10 mPas) reaktív monomerekből és oligomerekből álló keveréket, illetve aktivátort és katalizátort fecskendeznek a szerszámba [3, 4, 33]. A szerszámban polimerizálódik az anyag és létrejön egy termoplasztikus polimer kompozit termék [3]. A száltartalom akár a 60 %-ot is elérheti [35]. A feldolgozó berendezés felépítése a 17. ábrán látható.



17. ábra: Az T-RTM gép felépítése: A: fűtési rendszer, B: kaprolaktám és katalizátor, C: adagoló, D: megolvasztó egység, E: adagoló pumpa, F: szerszám, G: keverőfej, H: termék, I: záróegység, K: aktivátor [36]

A gyártási folyamat 4 fő lépésre osztható fel. Az első lépésben az előre kivágott erősítőstruktúrát behelyezik a szerszámba. A második lépés során kellően kis viszkozitású

monomert/oligomert fecskendeznek be a szerszámba. Az aktivátor segít a reakció elindításában, a katalizátor pedig csökkenti a reakció aktiválási energiáját. A harmadik lépésben megkezdődik a polimerizáció. Az utolsó lépésben az elkészült terméket eltávolítják a szerszámból és esetlegesen utómunkálatokat végeznek rajta [37]. A szerszámzáró prés részeit a 18. ábra mutatja be.



18. ábra: A záróegység és a szerszám sematikus ábrája: 1: felső keret, 2: felső lap, 3: T-RTM szerszám felső része, 4: a T-RTM szerszám alsó fele, 5: alsó lap, 6: alsó keret [34]

A T-RTM technológiával készített termoplasztikus kompozitok a nagy szilárdságuk, újrahasznosíthatóságuk és az alacsony sűrűségük miatt alternatívát jelenthetnek az autóiparban használt egyes fém alkatrészek és kompozitipar térhálós termékei helyett [38].

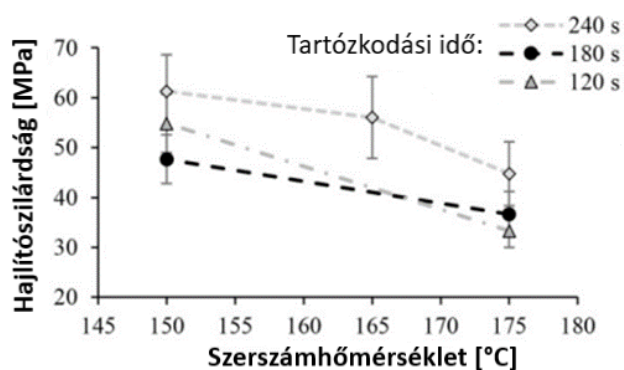
2.3.1. Gyártási paraméterek

A polimerizáció hőmérséklete nagy mértékben befolyásolja a kialakult molekulatömeget, a kristályos részarányt, az átalakulást (konverziót), valamint indirekt módon a kész termék termomechanikai jellemzőit. A laktámok polimerizációja végrehajtható az anyag olvadási hőmérséklete (T_m) alatt és felett is. Az olvadási hőmérséklet alatti polimerizációnak több előnye is van: rövidebb a gyártási ciklus, a felhasznált energia kevesebb, illetve nagy kristályos részarány (40-50 %) és nagy átalakulási hányad (96-99 %) érhető el [39]. Semperger és társai [39] többek között a kristályos részarány és a szerszám hőmérséklete közötti összefüggést is vizsgálták. A 19. ábrán jól látszik, hogy a szerszámhőmérséklet növelésével a kristályos részarány csökken.



19. ábra: Kristályos részarány és a T-RTM szerszám hőmérsékletének összefüggése [39]

Ezenkívül megvizsgálták a hajlító szilárdságot is a szerszám hőmérsékletének függvényében. A szerszám hőmérsékletének növelésével a hajlítószilárdság csökken (20. ábra), ami a kialakult kristályos részarányának köszönhető.



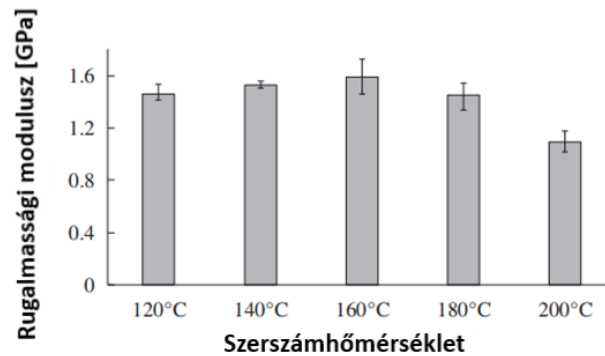
20. ábra: Hajlító szilárdság és a T-RTM szerszám hőmérsékletének összefüggése [39]

A monomer átalakulási hányadot TGA-val (Termogravimetrikus analízis) vizsgálták. A legmagasabb átalakulási hányadot 150 °C-on sikerült elérniük, ami körülbelül 97 %, ami az eddigi tapasztalatokhoz hasonlóan a szerszám hőmérsékletének növelésével csökkent (21. ábra).



21. ábra: Monomer átalakulási hányad – T-RTM szozáshőmérséklet [39]

Lee és kutatótársai [40] egy felületkezelési módszert dolgoztak ki T-RTM technológiához, amely során a rugalmassági modulus és a szozáshőmérséklet közötti összefüggést is vizsgálták. A mérések alapján a rugalmassági modulus 160 °C-os szozáshőmérsékleten volt a legnagyobb, megközelítőleg 1,5 GPa, ami 180 és 200 °C-os szozáshőmérsékletnél már jelentősen csökkent (22. ábra).



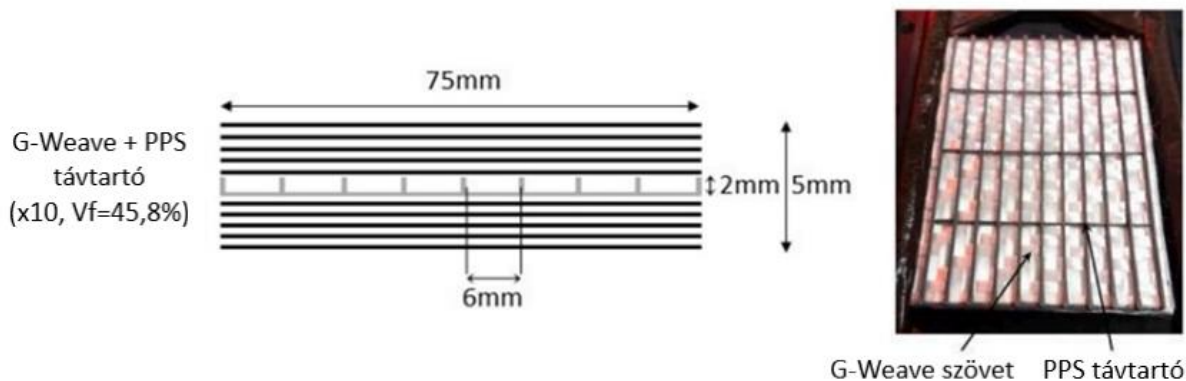
22. ábra: Rugalmassági modulus a szozáshőmérsékletének összefüggésében [40]

Choi és társai [37] a T-RTM gyártás különböző paramétereinek függvényében vizsgálták a szakítószilárdság és a polimerizációs fok változását. A próbatetek gyártása során az injektálási sebességet, az aktivátor és a katalizátor arányát változtatták. Eredményül pedig a következőket kapták: a mátrix anyag injektálási sebessége nem befolyásolta a szakítószilárdságot, azonban a polimerizációs fok növekedett a sebesség növelésével. Az aktivátor növelésével csökkent a szakítószilárdság, a polimerizációs fok pedig 2 m% esetében volt a legnagyobb. A katalizátor mennyiségének növelésével pedig mind a szakítószilárdság, mind a polimerizációs fok növekedett.

2.3.2. T-RTM technológiával készített kompozitok

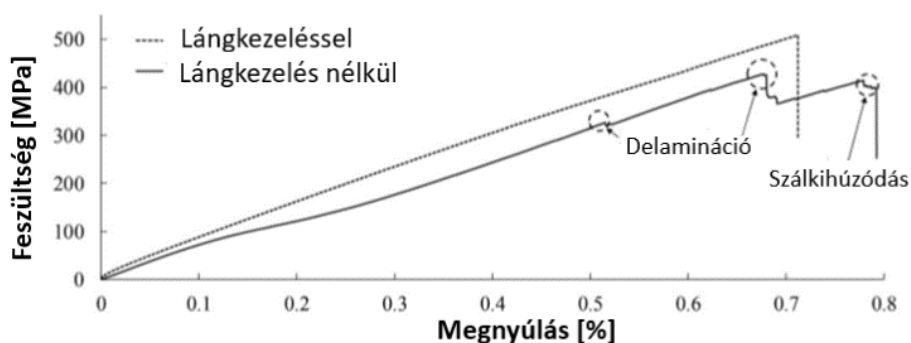
Ebben a fejezetben különböző T-RTM technológiákkal készített kompozitokat ismertetek. Ezzel a technológia sokszínűségét és az elkészült kompozitok mechanikai tulajdonságait mutatom be. Így a várható eredményekről is képet kapunk.

Kovács és társainak [24] munkájában az égésgátolt T-RTM technológiával készített kompozitokat hasonlították össze. A PA6 égésgátlása különösen fontos lehet bizonyos alkalmazásokban, a jó éghetősége miatt. T-RTM technológiával készítettek szénszálas PA6 kompozitokat. Kimutatták, hogy az adalékolás többek között a polimerizáció folyamatát is befolyásolta. Ezenkívül az adalékanyag homogén eloszlása is problémát jelentett a kis viszkozitású mátrixban. A problémát égésgátló folyadék hozzáadásával küszöbölték ki. A legjobb eredményeket hexafenoxiciklotrifoszfazénnel sikerült elérni. A UL-94 vizsgálattal már 10 m% adalékanyag hozzáadása mellett sikerült a V-0-ás besorolást elérni. Semperger és társai [41] is a T-RTM-mel gyártott termék adalékolásával foglalkoztak, amely során szénszálas PA6 mátrixú kompozitot gyártottak. Ők az IMC (in-mold coating) eljárással hoztak létre adalékanyaggal módosított felületi réteget. Megfelelő adhéziót a szerszám részleges nyitásával, majd a termékre való ráinjektálással sikerült elérniük. A legjobb leszakító-szilárdságot (4 MPa) 180 s-os reakció idővel érték el. Mindezek mellett amikor a felület injektálására 5 perc holtidőt állítottak be, a húzószilárdság 4,5 MPa-ra növekedett. Murray és kutatótársai [3] üvegszálas poliamid 6 mátrixú kompozitot készítettek T-RTM technológiával. Céljuk a kompozitgyártás során fellépő légbuborékok minimalizálása volt. Ez a jó mechanikai tulajdonságok elérése miatt fontos. A légbuborékokat komputertomográfiával (CT) vizsgálták meg. Kimutatták, hogy a makro- és a mikroméretű légbuborékok a kész kompozit térfogatának 1 %-át tették ki. Ezek mellett a minták kristályos részaránya 45 %, a hajlítószilárdsága pedig 691 MPa lett. Gomez és társai [42] nagyméretű (1,5 x 1,6 m) autóipari kompozit alkatrészek sorozatgyártásához fejlesztettek ki egy gyártási módszert. Ehhez kis viszkozitású (30 Pas, 280 °C-on) előre polimerizált poliamid 6-ot és üvegszálat használtak. A szerszámban 3D nyomtatott PPS (polifenilén szulfid) távtartókat helyeztek el, csatornákat hozva létre (23. ábra).



23. ábra: Az szerszámban elhelyezett PPS távtartók [42]

A távtartókat úgy tervezték meg, hogy nagy áteresztőképességgel rendelkezzenek és kibírják a nagy nyomást az impregnálási hőmérsékleten. A gyártás megismételhetősége ezzel növekedett, valamint a kontrolálhatóbb lett. A befecskendezési nyomást 3,6 bar-ra állították be. A legjobb hajlítószilárdságot (439 MPa) és hajlító modulust (19,4 MPa) 260 °C-os befroccsöntési hőmérsékleten érték el. Német kutatók egy csoportja [41] T-RTM gyártáshoz készítettek szenzorokat. Négyfajta szenzor típust használtak: hőmérsékletmérő, nyomásmérő, dielektrikum és ultrahangos. Ezek kombinációjával vizsgálták a polimerizációt és az áramlási frontot, amelyek segítségével a folyadékból való átalakulásról kaptak képet. A kísérlet végén 38 darab szenzor segítségével sikerült meghatározni az ömledékfrontot. Lee és társai [40] egy idő- és költséghatékony felületkezelési módszert dolgoztak ki polimer kompozitok gyártásához. Ezzel a módszerrel a kompozit tűzállóságát növelték, amelynek következtében a határközi adhézió is növekedett. Ezután a T-RTM technológia segítségével szénszállal erősített kompozitot készítettek és vizsgálták a mechanikai tulajdonságait (24. ábra).



24. ábra: A felületkezelésen átesett és kezeletlen polimer kompozitok mechanikai tulajdonságai [40]

A felületkezeléssel a húzómodulus esetében 18,5 %-os, míg a húzószilárdságnál 15 %-os növekedés figyelhető meg. Ezeket az értékeket 160 °C-os polimerizációs hőmérsékleten sikerült elérni. Louisy és kutatótársai [43] L-laktid polimerizálásával hoztak létre T-RTM technológia segítségével PLLA (poli(-l-tejsav)) mátrixú üvegszálak kompozitot. Katalizátorként ón(II)-2-etil-hexanoátot használtak. Így 99 %-os átalakulást és 78000 g mol^{-1} molekulatömeget sikerült elérniük. Az anyag emellett 47 %-os kristályos részarányral és 173 °C olvadási hőmérséklettel rendelkezik. Lee és társai [29] zeolit részecskéket adtak a ϵ -kaprolaktámhoz. A zeolit részecskék rendkívül jó vízmegkötő képességgel rendelkeznek. Segítségükkel a polimerizáció során a víz megléte miatti negatív hatásokat sikerült kiküszöbölni. Víztelen esetben az átalakulási hányad 84 % volt, míg a zeolitot tartalmazó vizes PA6 esetén 82 %. Az átlagos molekulatömeg a víztelen PA6 esetében 52000 g/mol , míg a zeolittal adalékolt vizes PA6 esetében 43000 g/mol -t sikerült elérni. Ezenkívül a zeolit hozzáadásával a rétegek közötti nyírósilárdság is növekedett 56,6 MPa-ról 57,8 MPa-ra.

2.4. Irodalmi összefoglaló, kritikai elemzés

Egyre többen foglalkoznak azzal, hogy milyen tulajdonságú kompozitok hozhatók létre T-RTM technológiával. Irodalomkutatásom tanulsága szerint a T-RTM eljárás egy jó minőséget biztosító technológia lehet, azonban további vizsgálatokra van szükség. Emellett többen kutatták már korábban PA6 szénszálak kompozitok ultrahangos hegesztését. Azonban ezek a kompozitok rövidszálak kompozitok voltak. Kutatásomban T-RTM technológiával gyártott hosszúszálak kompozitok hegeszthetőségét vizsgálom. Ehhez a fröccsöntött PA6, a T-RTM-mel gyártott PA6, valamint 2 rétegű és 4 rétegű kompozitokat fogok ultrahangos hegesztéssel összehegeszteni és összehasonlítani. Az irodalomkutatásom alapján minimum 15 MPa nyírófeszültséget tartok ideálisnak a hegesztett varratoknál.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

A kutatásomhoz felhasznált anyagokat és berendezéseket mutatom be ebben a fejezetben.

3.1. Felhasznált alapanyagok

A kompozitok gyártáshoz felhasznált alapanyagokat mutatom be a következőkben.

3.1.1. Kaprolaktám

Kaprolaktám alapanyagként AP-Nylon ϵ -kaprolaktámot (CL) használtam. Gyártója a német Brüggemann GmbH & Co. KG. Az anyag sűrűsége $1,02 \text{ g/cm}^3$, olvadáspontja $69 \text{ }^\circ\text{C}$. Olvadék állapotban az anyag viszkozitása vízhez közeli, 3-5 mPas.

3.1.2. Erősítőanyag

Az alkalmazott erősítő szövet a Zoltek Zrt. által gyártott PX35 szénszálaiból készült. Ebből a Saertex cég készítette el az X-C-305 típusú biaxiális elrendezésű ($+45^\circ/-45^\circ$), poliamidhoz írezt szövetet (1. táblázat).

1. táblázat: Az erősítőstruktúra tulajdonságai

Tulajdonság	Jellemző
Anyaga	Zoltek Panex 35-61 A 50K
Elemi szálak átmérője	7,2 μm
Rétegek területi sűrűsége	150 g/m^2
Szövet területi sűrűsége	305 g/m^2

3.1.3. Aktivátor és iniciátor

Aktivátorként hexametilén-1,6-dikarbamoil kaprolaktámot (Brüggolen C20P) alkalmaztam. Az aktivátor gyártója az L. Brüggemann GmbH & Co. KG cég (2. táblázat). A gyártáshoz 4 m% aktivátort raktam a keverékbe.

2. táblázat: Aktivátor jellemzői

Tulajdonság	Jellemző
NCO tartalom	17 %
Olvadáspont	70 °C
Sűrűség olvadékalapotban	1,02 g/cm ³
Térfogatsűrűség	800 g/l

A használt iniciátor nátrium-kaprolaktám (Brüggolen C10) volt. Gyártója az L. Brüggemann GmbH & Co. KG, Németországból (3. táblázat). A kompozit gyártáshoz 6 m% iniciátort kevertem a kaprolaktám és aktivátor mellé.

3. táblázat: Iniciátor adatai

Tulajdonság	Jellemző
Olvadáspont	62,2 °C
pH	13,3
Sűrűség olvadékalapotban	1,02 g/cm ³
Térfogatsűrűség	450-550 g/l

3.2. Alkalmazott berendezések

A kompozitok gyártásához az Engel Insert 200V/200H/80 fröccsöntőgépet használtam a D60-as in-situ egységgel. A gép 800 kN záróerővel, 2210-2400 bar maximális fröccsnyomással, 30/25 mm átmérőjű csigával és 99/69 cm³ adagsúllyal rendelkezik (25. ábra).



25. ábra: T-RTM technológiához használt fröccsöntőgép [44] és szerszám

A hegesztéshez a próbatesteket Mutronic körfűrészszel vágtam ki. A próbatestek hegesztéséhez a Herrmann Ultraschalltechnik HiQ Evolution Speed Control típusú ultrahangos hegesztő berendezést használtam. A gép maximális hegesztési ereje 3000 N, maximális teljesítménye 5000 W és hegesztési frekvenciája 20 kHz (26. ábra).



26. ábra: Herrmann Ultraschalltechnik márkájú ultrahangos hegesztő berendezés [45]

A lapka próbatestek egy Arburg Allrounder Advance 270S 400-170 fröccsöntőgéppel lettek legyártva (27. ábra). A fröccsöntőgép maximális záróereje 400 kN, oszloptávolsága 270 mm, maximális fröccsnyomása 2000 bar, a csigatámérője pedig 30 mm.



27. ábra: Arburg Allrounder Advance 270S fröccsöntőgép [46]

3.3. Vizsgálati módszerek

A varratok nyíróvizsgálatát a Zwick gyártó által forgalmazott Z020 típusú univerzális terhelőgépen végeztem (28. ábra).



28. ábra: Zwick Z020 szakítógép [47]

A varratok hegedési felületét a JEOL JSM 6380LA pásztázó elektronmikroszkóppal (29. ábra) és a Keyence VHX-5000 optikai mikroszkóppal (30. ábra) vizsgáltam.

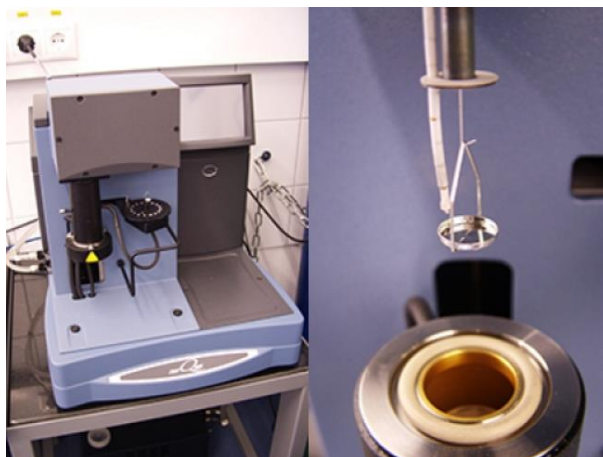


29. ábra: Jeol márkájú pásztázó elektronmikroszkóp [48]



30. ábra: Keyence gyártmányú optikai mikroszkóp [49]

A degradáció mértékét a TA Instruments által készített Q500 típusú TGA-val mértem (31. ábra).



31. ábra: Q500 TGA [50]

4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Ebben a fejezetben ismertetem a kutatásom során elvégzett kísérleteket és azok eredményeit.

4.1. Próbatestek gyártása

A hegesztési előkísérletekhez 80x80x2 mm méretű lapkapróbatesteket fröccsöntöttem PA6 anyagból, amit 3 egyenlő darabra vágtam fel körfűrészsel.

A kompozitok gyártásának előkészítéséhez először szénzálal erősítőanyagból vágtam ki darabokat elektromos olló segítségével. A vágás közben ügyeltem arra, hogy a szerszám geometriája szempontjából megfelelő lekerekítéseket alakítsak ki (32. ábra).



32. ábra: Darabok kivágása az erősítőanyagból

A gyártás előtt a kivágott darabokat 3 napon keresztül 80 °C-on tároltam szárítószekrényben. Ezzel a levegőből a szénzálalban, vagy a felületén megkötődő nedvesség tartalmát akartam minél alacsonyabb szinten tartani, hogy az a polimerizációs folyamatot ne befolyásolja.

A gyártás ezután az erősítőrétegek T-RTM szerszámba helyezésével történt. A kísérlethez 3 fajta gyártmányt készítettem el; 4 és 2 réteg erősítőanyaggal rendelkezőt, illetve erősítőanyag nélkülit (33. ábra).



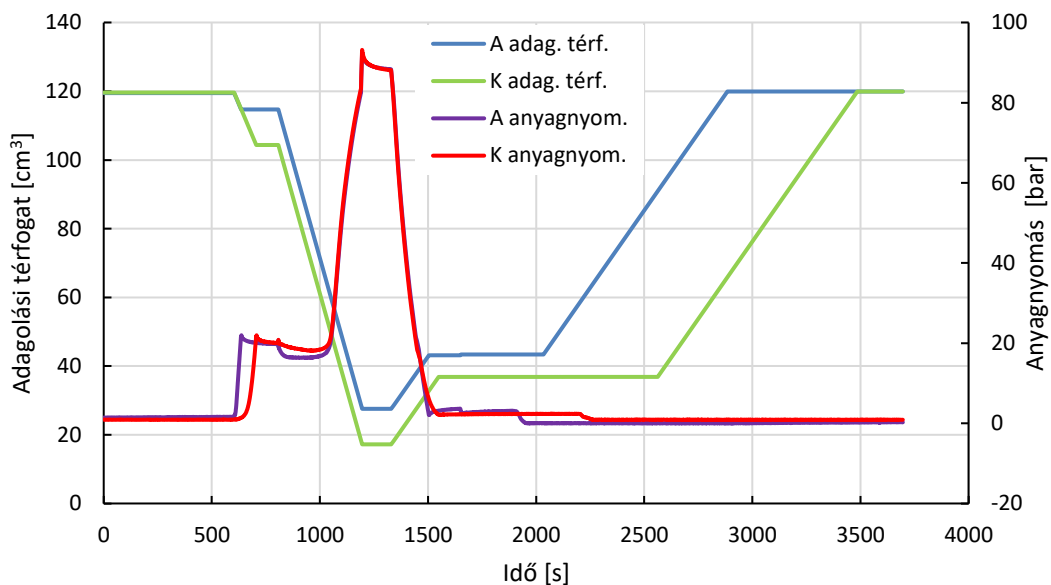
33. ábra: A készített lapok: 4 rétegű (bal), 2 rétegű (közép), erősítőanyag nélküli PA6 (jobb)

A gépen a gyártás során beállított különböző zónák hőmérsékletét a 4. táblázat mutatja be.

4. táblázat: Gyártáshoz használt hőmérséklet paraméterek

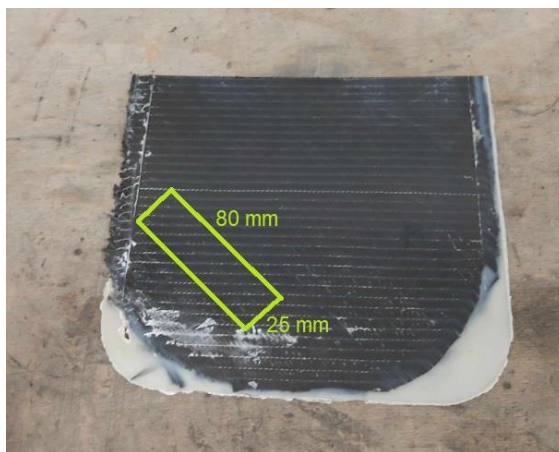
Zónák elnevezése	Érték
Dugattyú hőmérséklet aktivátor oldal	120 °C
Dugattyú hőmérséklet katalizátor oldal	120 °C
Keverőfej hőmérséklete	170 °C
Szerszám hőmérséklete	155 °C

A fröccsöntési sebesség $7,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ -ra lett meghatározva. A befroccsöntött térfogatot a 4 rétegű minta esetében 90 cm^3 -re, a 2 rétegű minta esetében 95 cm^3 -re és az erősítőanyag nélkülinél 100 cm^3 -re állítottuk be. A gép által használt szoftver segítségével a kompozitok gyártása során az aktivátor (A) és katalizátor (K) adagolási térfogatáramát, valamint anyagnyomásának alakulását is ábrázoltam az idő függvényében. A rendszer a térfogatáramot és a nyomást a dugattyúnál méri. A folyamat elején nyomás segítségével szivárgás ellenőrzés történik (leakage test). Ha a nyomás nem esik le, akkor elindul a folyamat. Ekkor az erősítőszövet átimpregnálásával az adagoló egységben mért nyomás növekedik. A szakasz végén az adagolási térfogat újra növekszik mindkét anyag esetében, mert a gép a következő ciklushoz szükséges adagsúlyt veszi fel (34. ábra).



34. ábra: Adagolási térfogat – idő és anyagnyomás – idő változása a 2 rétegű kompozit gyártása során

A térfogatáram és az anyagnyomás alakulása 4 rétegű kompozit gyártásánál is hasonló volt. Ezután a lapokból körfűrész segítségével 80x25 mm-es próbatesteket vágtam ki a hegesztéshez, figyelve a szálorientációra, ahogy az a 35. ábrán is látható.



35. ábra: Hegesztési próbatestek kivágásnak módja

4.2. Hegesztési paraméterek meghatározása

Ebben a fejezetben a hegesztési paraméterek meghatározásának folyamatát mutatom be. Ezen folyamat során fröccsöntött PA6 próbatesteken végeztem kísérleteket és értékeltem az eredményeket.

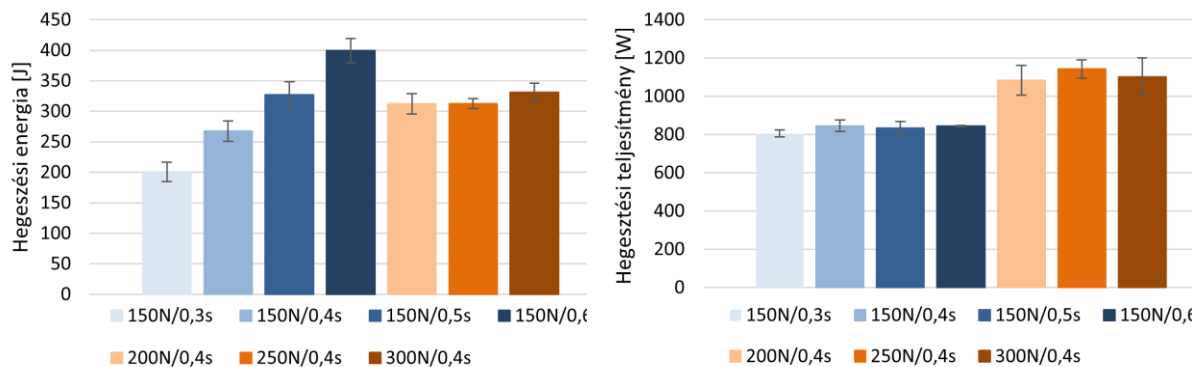
4.2.1. Fröccsöntött próbatetek hegesztése

A fröccsöntött próbateteket különböző beállítások mellett kettesével összehegesztettem. Célom ezzel, hogy megtaláljam azt a beállítást, amelyen minimális energia mellett a varrat létrejön, illetve azt is, ami már a mátrix anyag nagyfokú megömlését és degradációját eredményezi. Ezek alapján határoztam meg a T-RTM-mel készített próbatetek hegesztési paramétereit is. A hegesztőgépet idővezérelt módban használtam. Hegesztettem próbateteket 150 N hegesztési erővel, 0,3/0,4/0,5/0,6 s hegesztési idővel. Ezenkívül hegesztettem alkatrészeket 0,4 s hegesztési idővel 200/250/300 N hegesztési erő mellett (5. táblázat).

5. táblázat: A hegesztéshez használt paraméterek

150 N hegesztési erőnél beállított hegesztési idők	0,4 s hegesztési időnél beállított hegesztési erők
0,3 s	200 N
0,4 s	250 N
0,5 s	300 N
0,6 s	

Az ezekhez szükséges átlagos hegesztési energiát és teljesítményt foglalja össze a 36. ábra.



36. ábra: A fröccsöntött próbatetek hegesztési energiája és teljesítménye különböző paramétereken

Megállapítható, hogy a hegesztési idő növelésével a hegesztési energia együtt növekedett, viszont a hegesztési erő változtatása nem befolyásolta az energiát. Amíg a hegesztési teljesítményre a hegesztési idő nem volt hatással, addig a hegesztési erő növelésével a hegesztési teljesítmény növekedett.

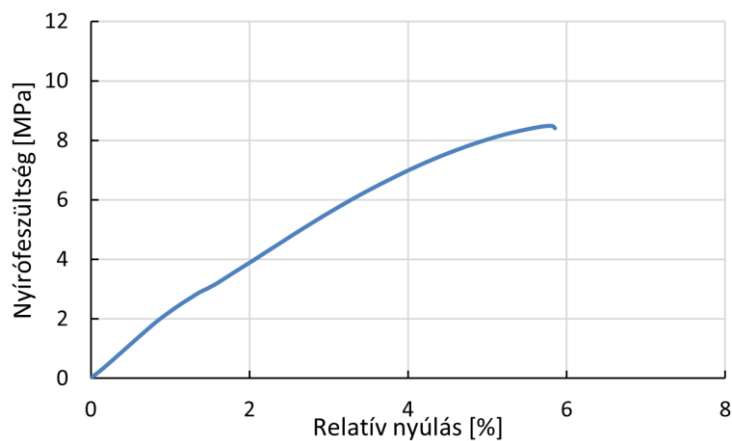
4.2.2. Összehegesztett fröccsöntött próbatetek szakítóvizsgálata

Az elkészült varratokat ezután nyíróvizsgálattal minősítettem. A befogási távolságot 80 mm-re, a szakítósebességet pedig 2 mm/perc-re állítottam be. A befogópofákat 2 mm-re toltam el egymáshoz képest (37. ábra).

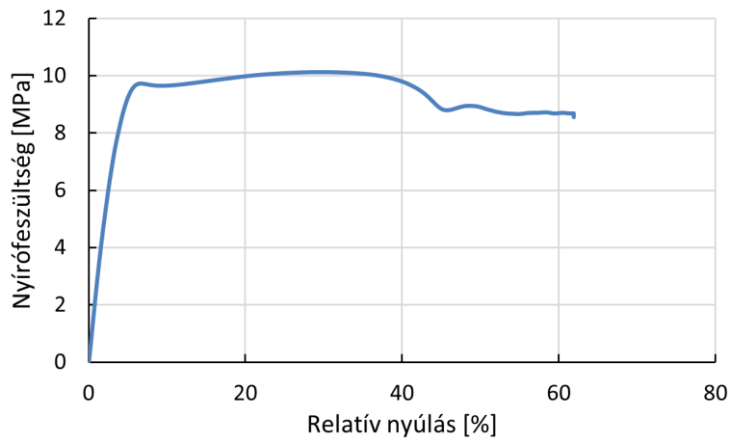


37. ábra: Fröccsöntött próbatest nyíróvizsgálata

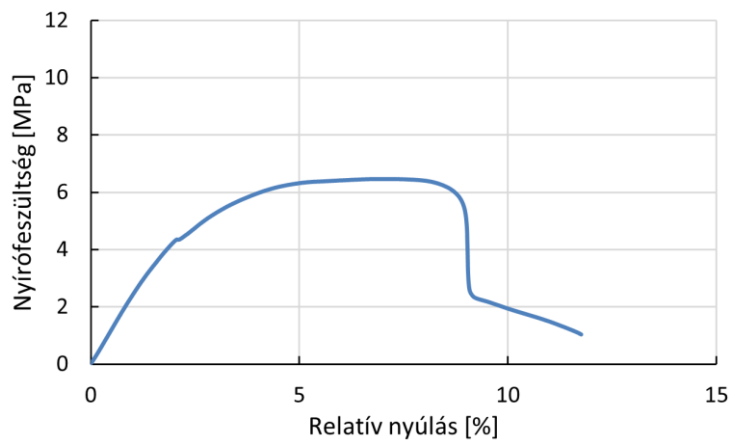
A vizsgálat során három jellemző viselkedést tapasztaltam: a varrat és az anyag rideg törését (38. ábra), az alapanyag nyakképződését (39. ábra), valamint a nem megfelelő hegedésénél varrat repedést (40. ábra).



38. ábra: A próbatest a varratnál ridegen törik

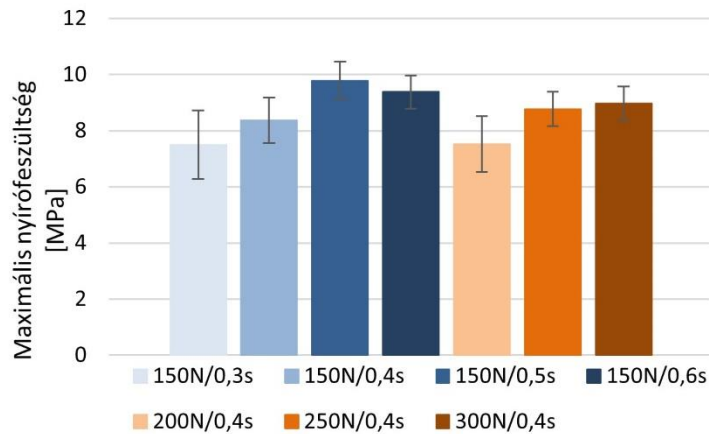


39. ábra: A próbatesten nyakképződés figyelhető meg

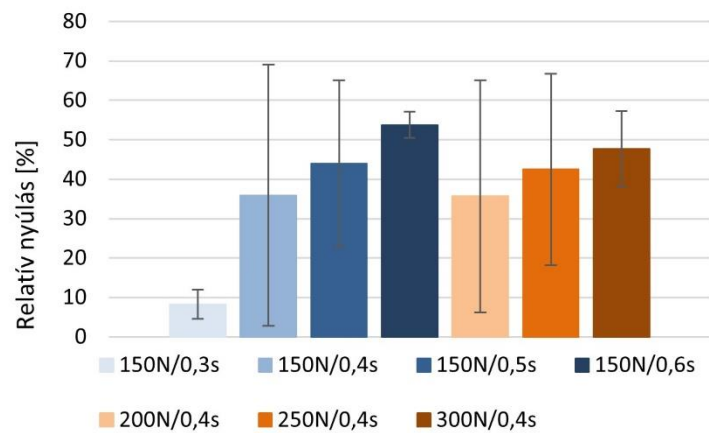


40. ábra: A varrat reped

A hegesztett varratok nyíróvizsgálatára jellemző nagy szórás miatt a mérés eredményeit oszlopdiagramok formájában értékeltem ki (41. ábra és 42. ábra).



41. ábra: Fröccsöntött próbatetek átlagos maximális nyírófeszültsége



42. ábra: Fröccsöntött próbatetek relatív nyúlása

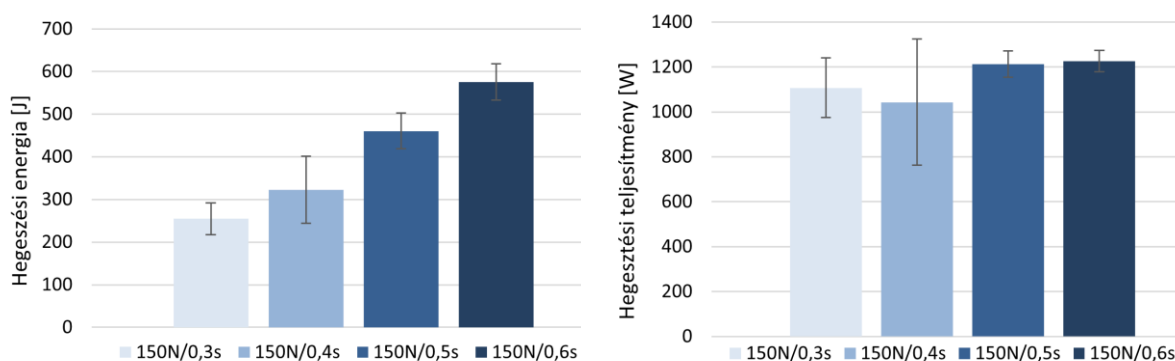
A 0,3 s-os hegesztési időnél a próbatetek hegedése nem volt megfelelő, ezért a deformáció és a maximális nyírófeszültség is jóval alacsonyabb volt. A testek ridegen, a hegedésnél törtek el, valamint egyes esetekben alacsonyabb nyírófeszültségnél varrat repedést figyeltem meg. Ezután a hegesztési idő növelésével egyre nagyobb deformációt és maximális nyírófeszültséget sikerült elérni. A 0,4 s-os hegesztési idővel hegesztett próbatetek között néhány esetben nyakképződést figyeltem meg, ami a hegesztési idő növelésével egyre gyakrabban történt. A varrat minősége 0,6 s-nál volt a legjobb, itt egyik esetben sem tapasztaltam varrat törést. Közel hasonló eredményeket a hegesztési erő növelésével 300 N-on sikerült elérni. Amíg a maximális nyírófeszültségben nem figyelhető meg nagy szórás, addig az alakváltozás esetében a különböző viselkedések miatt (varrat szakadás, varrat repedés, nyakképződés) jóval nagyobb szórást tapasztaltam.

4.3. T-RTM-mel gyártott próbatetek vizsgálata

Ebben a fejezetben a T-RTM-mel készített próbatetek ultrahangos hegesztését, nyíróvizsgálatát, optikai és pásztázó mikroszkópos vizsgálatát, valamint a differenciál pásztázó kalorimetria mérések eredményeit mutatom be.

4.3.1. Próbatestek hegesztése

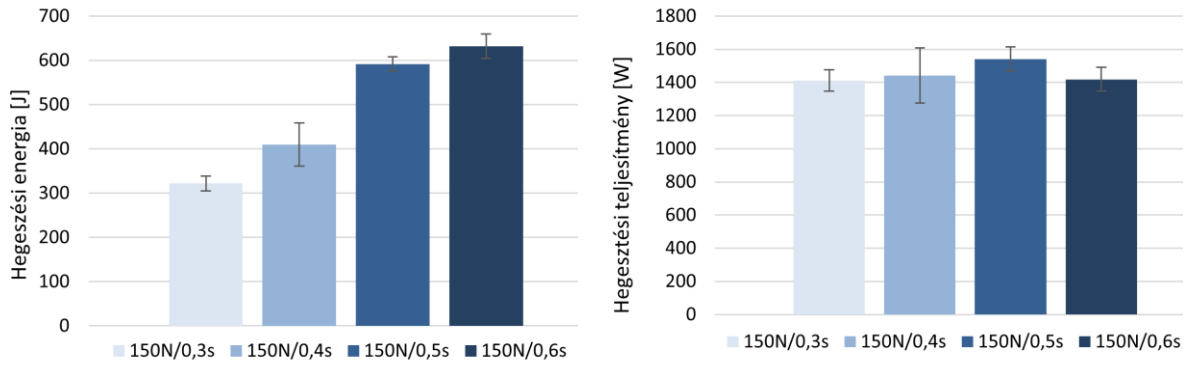
Az előkísérletek elvégzése után a T-RTM-mel gyártott próbateteket összehegesztettem. A PA6, a 2 rétegű és a 4 rétegű kompozitokat az előkísérletek figyelembevételével rögzített hegesztési erő (150 N) mellett hegesztettem össze. A hegesztési időt 0,3 és 0,6 s között változtattam. A hegesztési energiát és a hegesztési teljesítményt az eddigiekhez hasonlóan értékelem ki (43. ábra).



43. ábra: T-RTM-mel gyártott PA6 hegesztési energiája és teljesítménye különböző paramétereken

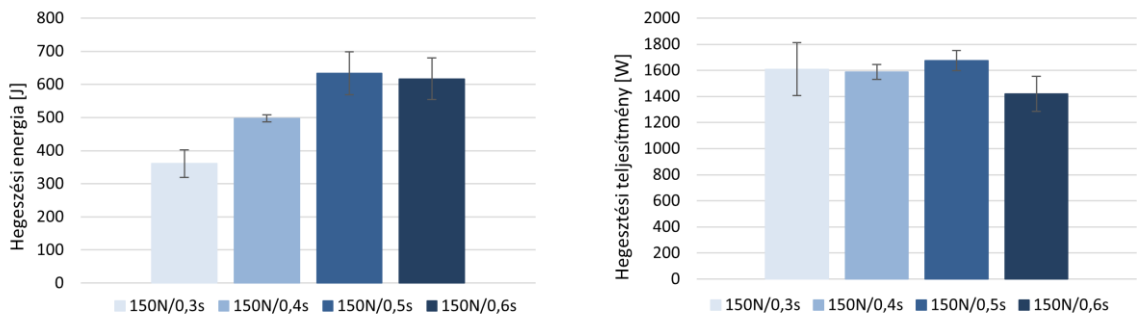
A hegesztési energiában nem figyelhetők meg jelentős különbségek a T-RTM-mel gyártott és a fröccsöntött próbatetek között. A hegesztési energia az idő növelésével megközelítőleg lineáris nő. A hegesztési teljesítmény T-RTM technológiával gyártott próbatetek esetén körülbelül 25 %-kal magasabb, mint a fröccsöntött próbatetek esetén. Ez valószínűleg a minták magasabb kristályos részarányának tudható be.

Ezután a 2 rétegű erősítőszövevel készített kompozitokat hegesztettem össze és az eddigiekhez hasonlóan vizsgáltam a hegesztéshez szükséges energiát és teljesítményt (44. ábra).



44. ábra: 2 rétegű kompozitok hegesztési energiája és teljesítménye különböző hegesztési paramétereken

A hegesztési idő növelésével növekszik az energia, míg a teljesítmény nem változik. A mátrix alapú próbatetekhez képest mind a hegesztési energiában, mind a hegesztési teljesítményben növekedés figyelhető meg. A 4 rétegű kompozitok hegesztési energiáját és teljesítményét a 45. ábrán mutatom be.

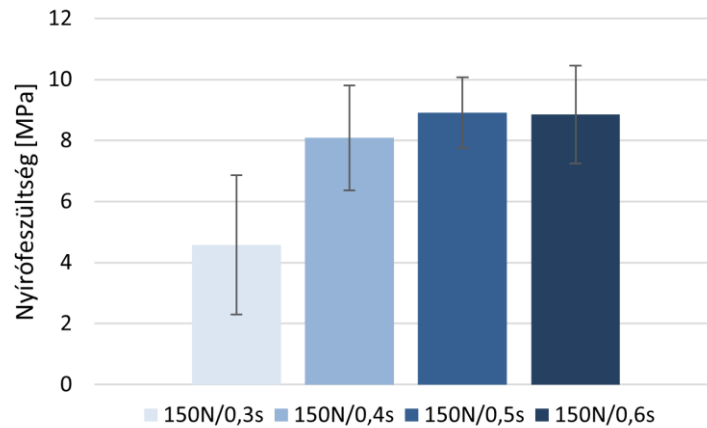


45. ábra: 4 rétegű kompozitok hegesztési energiája és teljesítménye különböző beállítások mellett

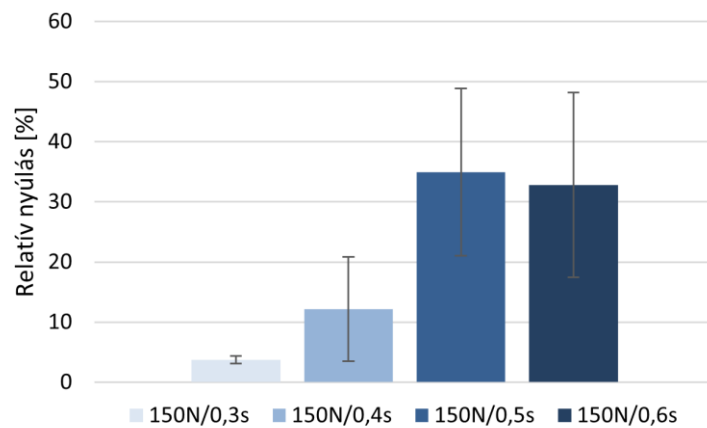
Megfigyelhető, hogy az erősítőanyag mennyiségének növelésével a hegesztéshez szükséges energia és teljesítmény is növekedett. A hegesztési energia a hegesztési idő növelésével 0,5 s hegesztési időig növekedett, ahol elérte a maximumot. A hegesztési teljesítmény 0,6 s hegesztési időnél körülbelül 15 %-kal kevesebb a többi beállításhoz képest.

4.3.2. Nyíróvizsgálat

A próbatetekeken ugyanazon beállítások mellett nyíróvizsgálatot végeztem el. Először a polimerizációval készült PA6 próbatetek eredményeit mutatom be (46. ábra és 47. ábra).

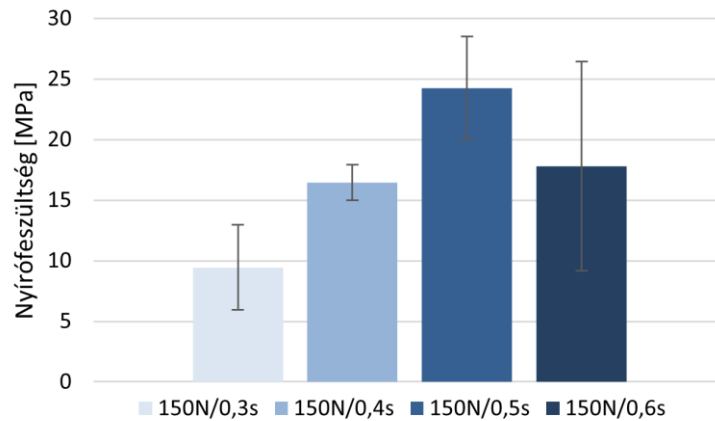


46. ábra: T-RTM technológiával készített hegesztett PA6 próbatestek nyírófeszültsége

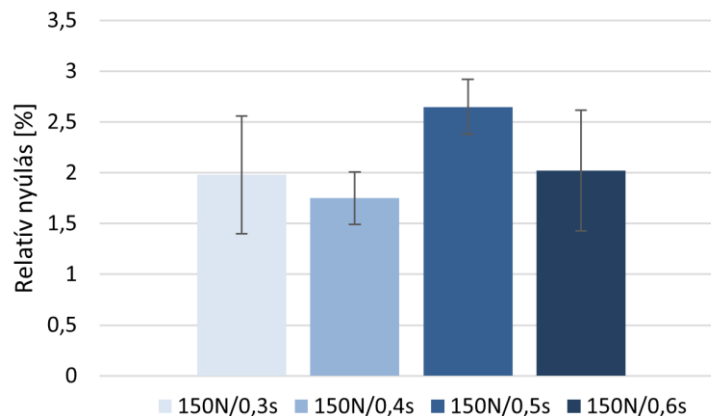


47. ábra: T-RTM-mel gyártott PA6 próbatestek relatív nyúlása

Itt is látszódik, hogy 150 N hegesztési erő és 0,3 s hegesztési idő mellett nem volt megfelelő a hegedés. Az elmozdulás és a nyírófeszültség is alacsonyabb a többi paraméterhez képest. A legnagyobb elmozdulást és nyírófeszültséget 0,5 s hegesztési időnél sikerült elérni. A T-RTM-mel gyártott PA6 próbatestek alakváltozása kisebb volt, mint a fröccsöntötteké, ez valószínűleg a nagyobb kristályos részaránynak köszönhető. A következőkben a 2 rétegű kompozitok nyíróvizsgálatának eredményeit mutatom be (48. ábra és 49. ábra).

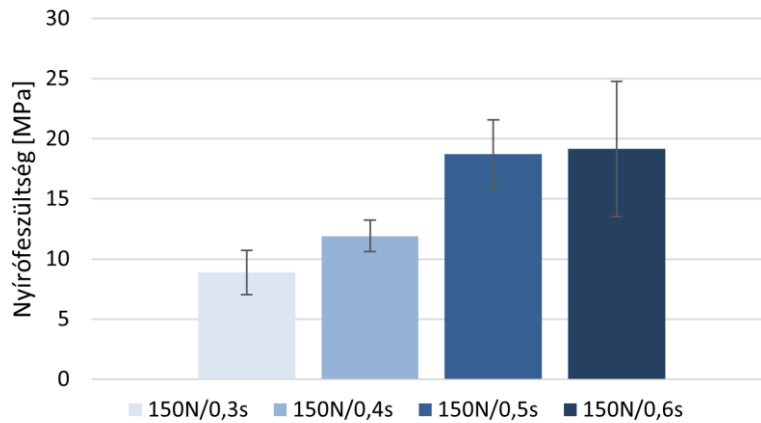


48. ábra: T-RTM-mel készített 2 rétegű kompozitok nyírófeszültsége különböző hegeztési paraméterek esetén

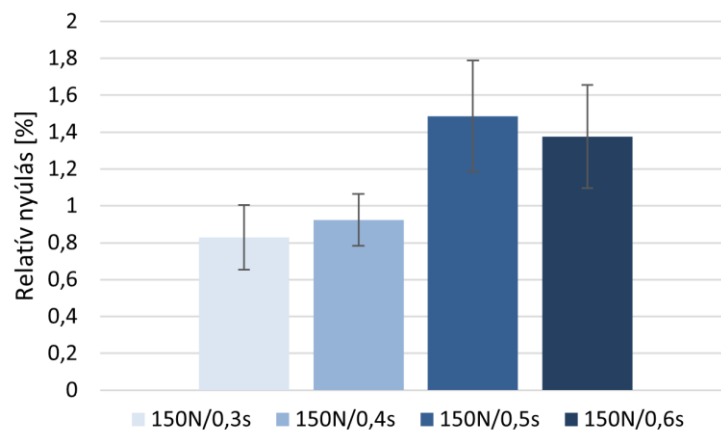


49. ábra: T-RTM eljárással készített 2 rétegű hegeztett kompozitok elmozdulása

Az előzetes számítások alapján a legjobb eredményeket mind a tönkremenetelhez tartozó nyúlás, mind nyírófeszültség szempontjából 0,5 s-os hegeztési idő mellett sikerült elérni. 0,6 s-os hegeztési időnél jelentősebb sorja képződés volt megfigyelhető. Ezeket az eredményeket a későbbiekben mikroszkópos vizsgálattal is ellenőrzöm. Ezután a 4 rétegű kompozitok nyíróvizsgálatának eredményeit mutatom be (50. ábra és 51. ábra).

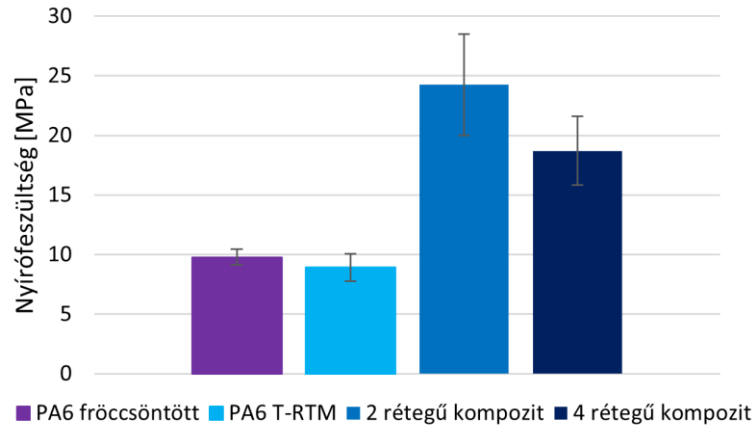


50. ábra: T-RTM készített 4 rétegű hegesztett kompozitok nyírófeszültsége



51. ábra: 4 rétegű hegesztett kompozit elmozdulása

Maximális nyírófeszültség szempontjából a 4 és a 2 rétegű kompozitok hasonló eredményeket hoztak, míg alakváltozás szempontjából a 2 rétegű T-RTM-mel készített kompozitok körülbelül kétszer akkora relatív nyúlásra képesek. Ezt arra lehet visszavezetni, hogy a 4 rétegű kompozit esetében nem volt elég mátrixanyag a jobb alakváltozási képességekkel rendelkező varrat létrejöttéhez. A készített kompozitok 2,5-3-szor nagyobb nyírófeszültséggel rendelkeznek, mint a T-RTM-mel gyártott, valamint a fröccsöntött PA6 próbatetek. Ezenkívül megállapítható, hogy a T-RTM-mel gyártott hosszúszálas kompozitok ultrahangos hegesztéssel hegeszthetőek. A legnagyobb nyírófeszültségeket a 150 N/0,5 s hegesztési paraméterrel sikerült elérnünk (52. ábra).

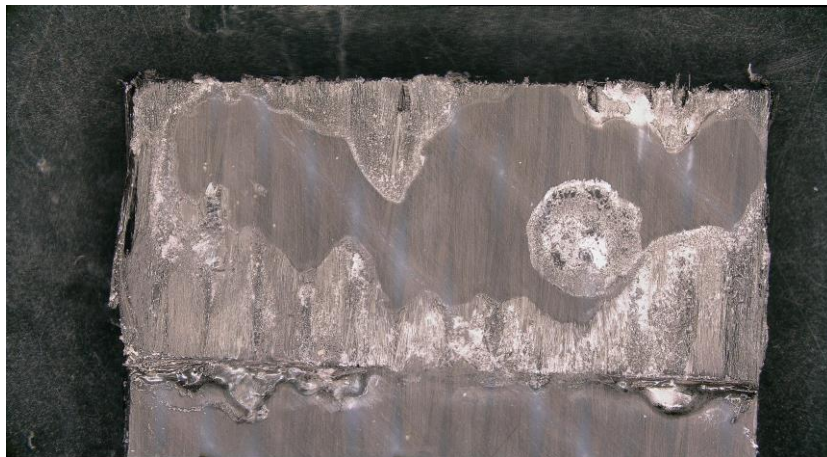


52. ábra: A különböző anyagok nyírófeszültsége 0,5 s hegesztési idő mellett

A fröccsöntött és a T-RTM-mel készített PA6 próbatestek között szóráson belüli különbség van. Maximális nyírófeszültségük 9 MPa. A 2 rétegű kompozittal 25 MPa és a 4 rétegű kompozittal 19 MPa maximális nyírófeszültséget sikerült elérni. A 2 rétegű T-RTM-mel gyártott kompozit szakítószilárdsága 161 MPa, míg a 4 rétegűé 406 MPa.

4.3.3. Optikai mikroszkóp

A mikroszkópos vizsgálatok során a hegesztett próbatestek töretfelületét és a varratokat vizsgáltam. A töretfelületekről először egy több részből összeillesztett, nagyfelbontású képet készítettem 20-szoros nagyítás mellett (53. ábra).



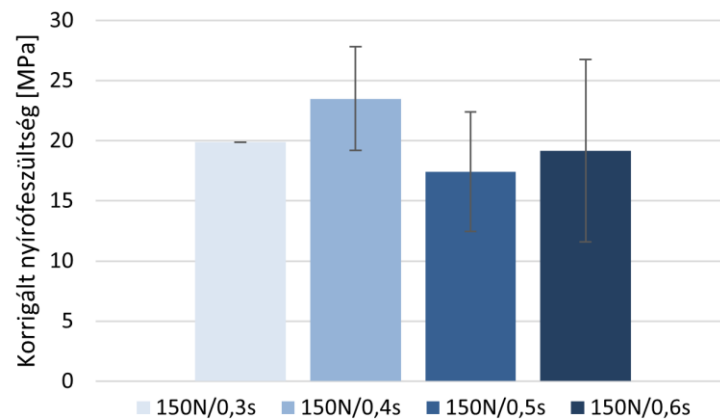
53. ábra: 4 rétegű kompozit hegesztett kompozit töretfelületéről optikai mikroszkóppal készített kép

A hegesztett terület világos árnyalattal rendelkezik. Ezeket a részeket az optikai mikroszkóp által használt szoftver segítségével lemértem (54. ábra).

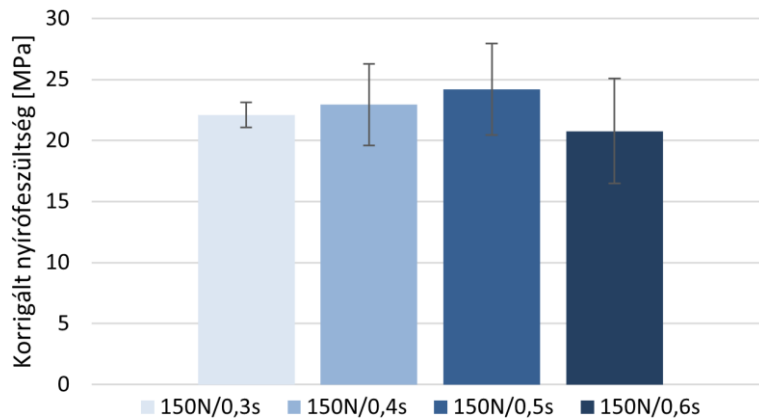


54. ábra: A varrat területének mérése

A varratok területének lemérése után fajlagosítottam a nyírófeszültségeket azok területével. Ezzel a varratok területének nyírófeszültségre gyakorolt hatását vizsgáltam meg, tehát milyen mértékben változnak a maximális nyírófeszültségek a különböző paraméterek mellett, hogyha a valós területtel számolom ki a feszültségeket (55. ábra és 56. ábra).



55. ábra: 2 rétegű kompozit maximális korrigált nyírófeszültsége



56. ábra: 4 rétegű kompozit maximális korrigált nyírófeszültsége

Összehasonlítva a korábban lemért és egyszerű területszámítással kiszámolt névleges felülettel kapott nyírófeszültség értékeket, és megállapítható, hogy a hegesztési paramétereket úgy kell megválasztani, hogy maximalizálni tudjuk a hegesztési felületet. Az optikai mikroszkóppal lemért varrat területeket táblázatokban is megmutatom (6. táblázat és 7. táblázat).

6. táblázat: 2 rétegű kompozit

Mérések	0,3 s	0,4 s	0,5 s	0,6 s
1	-	210,9 mm ²	279,4 mm ²	282,5 mm ²
2	160,7 mm ²	229,0 mm ²	-	274,2 mm ²
3	-	145,2 mm ²	298,1 mm ²	-
Átlag	-	195,1 mm ²	288,7 mm ²	278,4 mm ²
Szórás	-	44,08 mm ²	13,23 mm ²	5,88 mm ²

7. táblázat: 4 rétegű kompozit

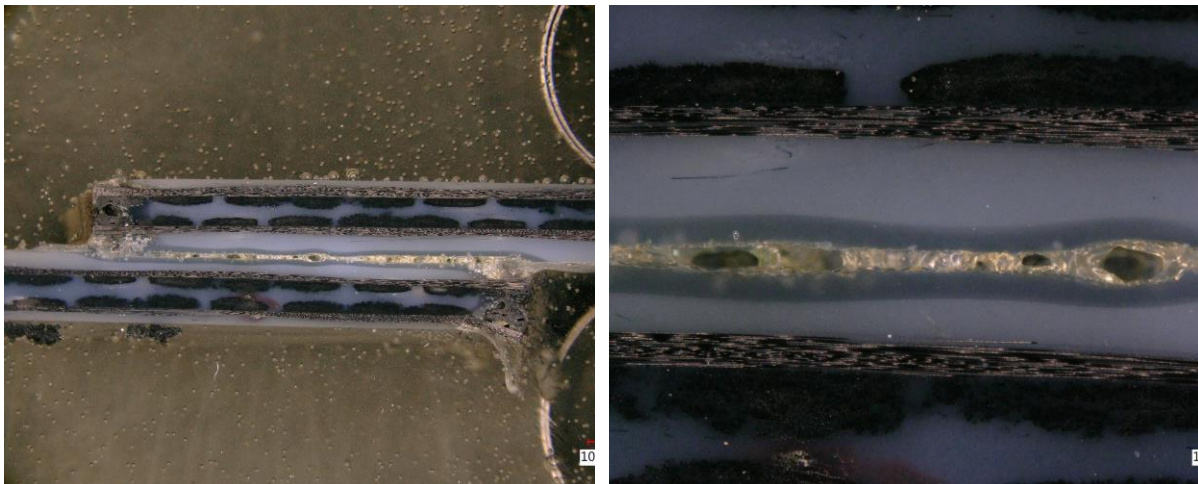
Mérések	0,3 s	0,4 s	0,5 s	0,6 s
1	-	-	241,5 mm ²	-
2	98,13 mm ²	189,4 mm ²	324,8 mm ²	284,2 mm ²
3	97,00 mm ²	127,5 mm ²	198,1 mm ²	272,2 mm ²
4	110,4 mm ²	134,4 mm ²	139,3 mm ²	196,5 mm ²
Átlag	101,9 mm ²	150,4 mm ²	225,9 mm ²	251,0 mm ²
Szórás	7,453 mm ²	33,93 mm ²	78,07 mm ²	47,57 mm ²

Ahol nem tudtam a varrat méretét lemérni, ott nem szakadt el a próbatest, mindössze elrepedt. A varratok vizsgálatához a hegesztett próbatestből kivágott részeket ágyaztam be epoxi gyantába. Majd csiszoltam és políroztam a felületüket (57. ábra).



57. ábra: A beágyazott minták gyanta öntés után (bal) és csiszolás, polírozás után (jobb)

Ezután optikai mikroszkóp segítségével képeket készítettem a kompozitok hegesztett kötéséről, ezzel a varratok minőségét vizsgáltam. Már 20x-os nagyításban jól észrevehető a határfelület mentén a mátrixanyag habosodása, ami a varrat két végén még jelentősebb (58. ábra).



58. ábra: 2 rétegű kompozit varrata 20-szoros nagyításban (bal), 100-szoros nagyításban (jobb)

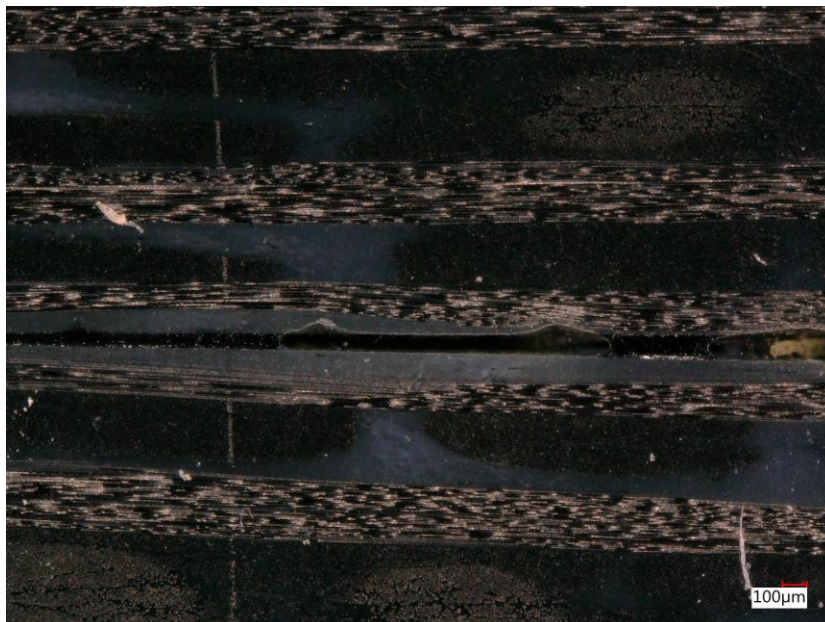
A habosodás a töretfelületen is jól látható. A habosodás a varrat szélein jelentősebb. A hegesztés erősségére és minőségére ez a jelenség negatív hatással van, mivel rontja az adhéziót. A habosodás valószínűleg a minták nedvességtartalmából adódik. A világosabb részek a

nyíróterhelés miatt jöttek létre. Az adhézió mértéke a varrat középső részein jelentősebb. A képen a kétrétegű kompozitok aszimmetrikussága is látszódik, azaz az egyik oldalon jóval több mátrix anyag van, mint a másikon (59. ábra).



59. ábra: Mátrix anyag habosodása 2 rétegű kompozitnál

A 4 rétegű kompozitnál a varraton nem figyelhető meg habosodás, azonban itt is láthatóak üregek a határfelületen (60. ábra).



60. ábra: 4 rétegű kompozit varrat

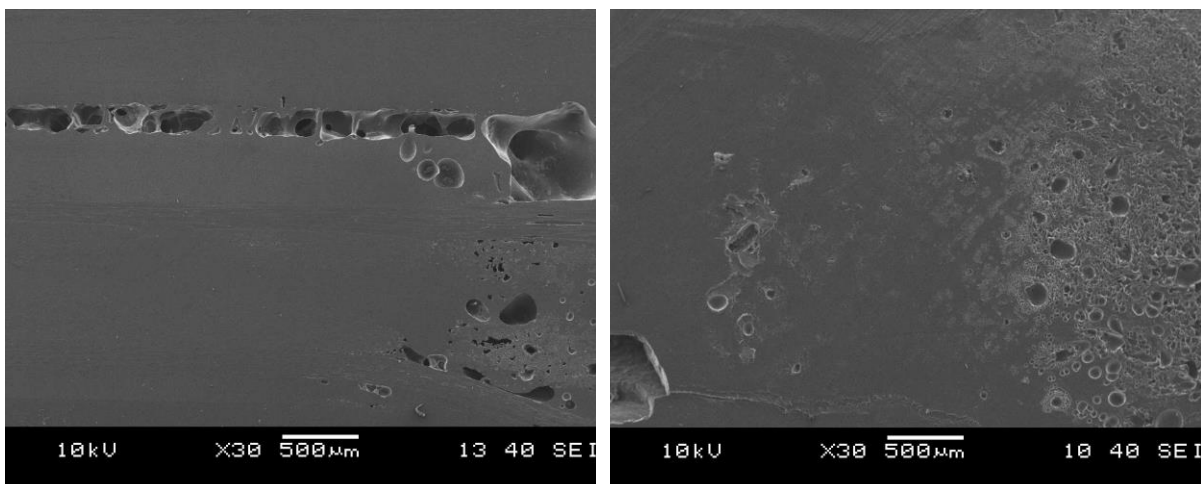
A határfelületen itt is látható habosodás, azonban ez a 2 rétegű kompozithoz képest kisebb területen figyelhető meg, a kevesebb mátrix anyag miatt (61. ábra).



61. ábra: 4 rétegű kompozit töretfelülete

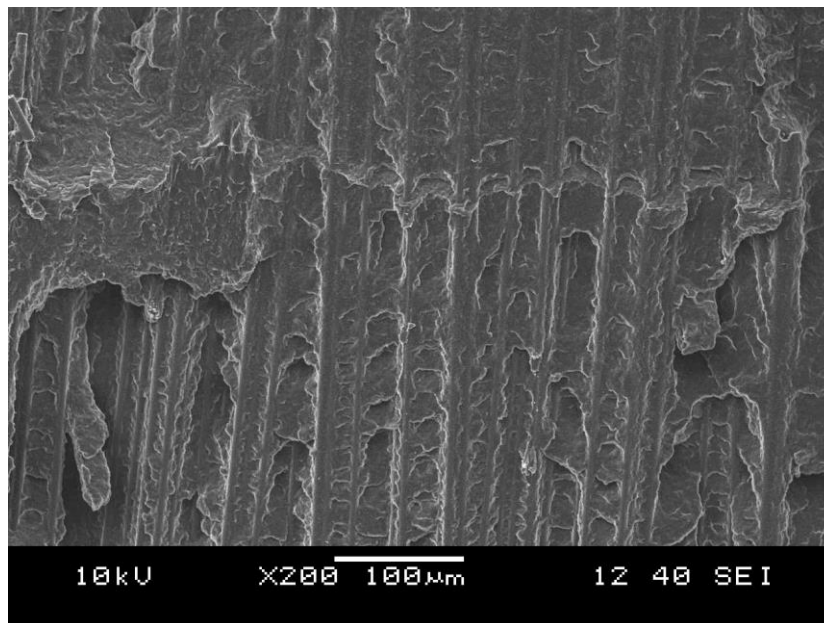
4.3.4. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat

Az epoxi gyantába ágyazott hegesztett kötésekről és a töretfelületekről pásztázó elektronmikroszkóppal is készítettem felvételeket (62. ábra). A habosodás jelensége itt is megfigyelhető mind a varratoknál, mind a töretfelületről készített képek esetében.



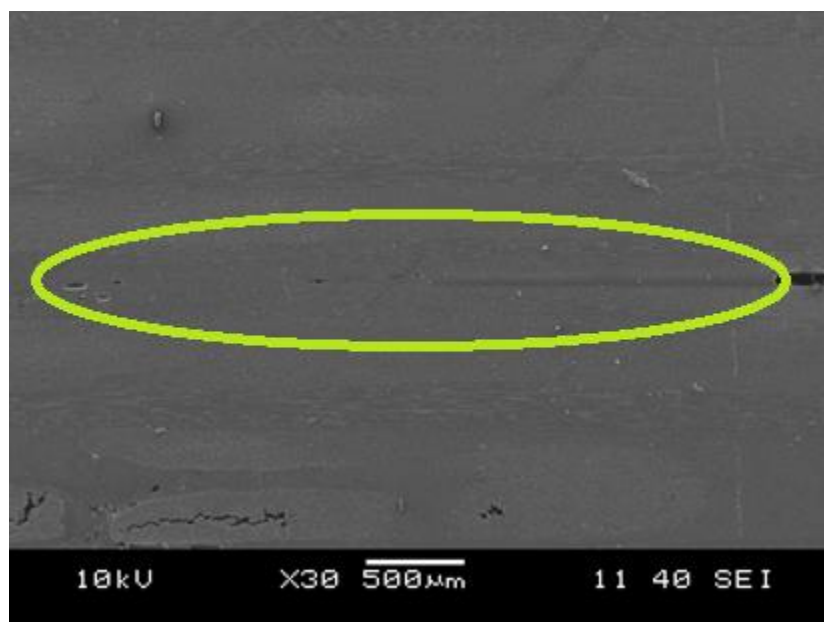
62. ábra: A habosodás jelensége a hegesztett kötéseknél (bal), a töretfelületfelületen (jobb)

Ezenkívül a 2 rétegű kompozit töretfelületén megfigyelhető, hogy az erősítőanyag megfelelő mértékben át lett itatva mátrix anyaggal, így jó határfelület jött létre (63. ábra).



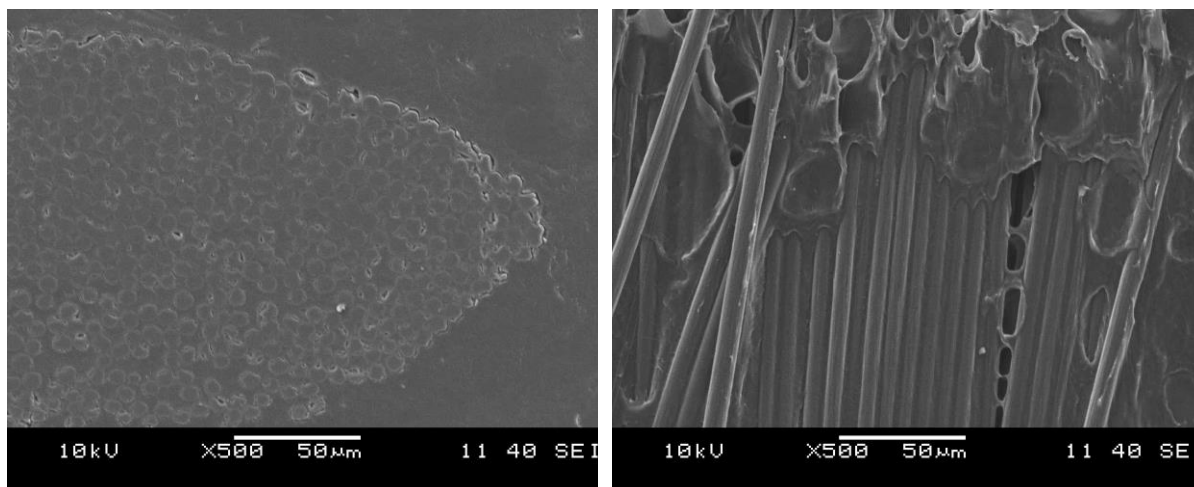
63. ábra: Az erősítőanyag és a mátrix anyag kapcsolata

A 4 rétegű kompozitról készített elektronmikroszkópos képeken még inkább észrevehető, hogy a két összehegesztett minta között egy szakaszon közös fázis jött létre (64. ábra), azaz a hegesztés megfelelő volt.



64. ábra: 4 rétegű kompozit közös fázis

A 4 rétegű kompozitnál is megállapítható, hogy megfelelő adhézió jött létre a szénzál és a mátrix anyag között (65. ábra), az infiltráció megfelelő volt.



65. ábra: Erősítőanyag és a mátrix anyag közötti kapcsolat a 4 rétegű kompozitnál

4.3.5. Differenciál pásztázó kalorimetria

A DSC (Differenciál Pásztázó Kalorimetria) méréssel a különböző minták kristályos részarányát határozom meg. A mátrix anyagból mintákat vettem a fröccsöntött PA6-ból, T-RTM-mel készített PA6-ból, illetve a 2 rétegű kompozitból a hegesztett és nem hegesztett részokról. A 4 rétegű kompozitot nem tudtam vizsgálni a kevés mátrixanyag tartalom miatt. A próbatestekből átlagosan 5-6 mg tömegű mintákat vágtam ki. A mintákat 10 °C/perc-es sebességgel fűtöttem fel 25 °C és 250 °C között. A kristályos részarányt az első felfűtésből számoltam ki a következő képlet segítségével [51]:

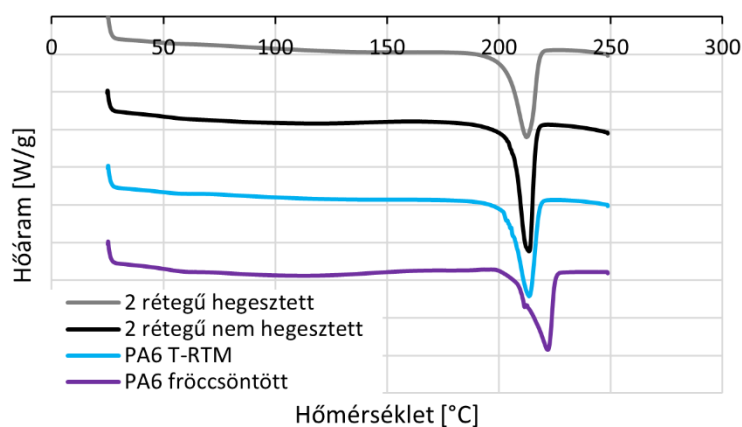
$$x = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_{kr} \cdot (1 - \alpha)} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

ahol x [%] a kristályos részarány, ΔH_m [J/g] a mért kristályolvadási entalpia, ΔH_{cc} a hidegkristallizáció entalpiája, ΔH_{kr} [J/g] az elméleti 100%-os kristályos részarányal rendelkező polimer entalpiája (ennek értéke 188 J/g [51]) és α [m%] a töltőanyagtartalmat jelenti. Ezek alapján a kristályos részarányok a következőképpen alakultak (8. táblázat).

8. táblázat: A minták kristályos részaránya

Minta elnevezése	1. felfűtés ΔH_m [J/g]	1. felfűtés x [%]	1. lehűtés ΔH_m [J/g]	1. lehűtés x [%]
2 rétegű T-RTM hegesztett rész	73,64	39,17	45,94	24,44
2 rétegű T-RTM nem hegesztett rész	79,70	42,39	45,63	24,27
PA6 T-RTM	68,64	36,51	44,41	23,62
PA6 fröccsöntött	66,58	35,41	59,55	31,68

A kompozit próbatetek nagyobb kristályos részarányal rendelkeznek az első felfűtés során, mint az erősítetlen próbatetek. A T-RTM-mel történő gyártás esetén a polimerizáció miatt nagyobb kristályos részarányt lehet elérni, mint fröccsöntés esetében. Hegesztéssel csökken a kristályos részarány, mivel a minta felületét megolvasztjuk és újra lehűtve, kontrollált körülmények között kristályosítjuk azt. Így ez befolyásolhatja a hegesztési zóna tulajdonságait. Megolvasztás után a kristályos részarány értékében csökkenés figyelhető meg, a visszaesés mértéke a fröccsöntött minta esetében a legkisebb. A különböző minták első felfűtési hőáram alakulását a 66. ábrán ábrázoltam.



66. ábra: Minták hőáram alakulása

A kristályolvadás közel azonos hőmérsékleten kezdődik el mindegyik minta esetében. A T-RTM-mel készített minták kristályolvadási csúcsa jóval intenzívebb és szűkebb, mint fröccsöntött esetben. Ez annak köszönhető, hogy a T-RTM-es minták jóval magasabb kristályos részarányal rendelkeznek és a kristályok lamellavastagsága is egyenletesebb. Míg a polimerizált mintáknál jellemzően γ kristálmódosulatok keletkeznek (213 °C környékén), addig a fröccsöntött minta esetében a γ mellett a jóval stabilabb α is megjelenik. (221 °C környékén).

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az ultrahangos hegesztés a mechanikai súrlódáson alapú hegesztési technológiák csoportjába tartozik. A rezgéseket a konverterben elhelyezkedő piezoelektromos kristályok hozzák létre, amelyek a nagyfrekvenciájú váltóáram hatására periodikusan összehúzódnak és kitágulnak. Ezeket a rezgéseket a booster erősíti fel és szonotróda közli a munkadarabokkal.

A T-RTM gyártástechnológia a folyékony kompozit öntő technológiák fejlődésével jelent meg a 2010-es évek második felében. A gyártási eljárás az RTM eljárás termoplasztikus fajtája. A gyártás során alacsony viszkozitású oligomerból és monomerből álló keveréket juttattunk a szerszámba, ehhez aktivátort és katalizátort adunk. A T-RTM-ben használt poliamid 6-ot leggyakrabban az ϵ -kapolaktám monomer gyűrűfelnýtásos polimerizációjával hozzák létre. A szerszámban a nagy nyomással (110-120 bar) beinjektált anyag emelt hőmérséklet (~160 °C) alatt polimerizálódik. Az így készült nagy szilárdságú termoplasztikus kompozitok alternatívát jelenthetnek az autóiparban egyes fém alkatrészek helyett.

A kutatásomban T-RTM-mel készített kompozitok ultrahangos hegesztését vizsgáltam. Készítettem 2 rétegű és 4 rétegű szén-szálalás kompozitokat és ezeket hasonlítottam össze T-RTM-mel gyártott PA6 és fröccsöntött PA6 műanyagok hegeszthetőségével. Az ultrahangos hegesztéshez 80x25 mm-es próbatesteket vágtam ki a gyártmányból a száliránynak megfelelően. Először a fröccsöntött próbatestek segítségével meghatároztam a megfelelő hegesztési paramétereket. A kompozitokat végül idővezérelt módban hegesztettem 150 N hegesztési erő mellett 0,3/0,4/0,5/0,6 s hegesztési idővel. A próbatesteken nyíróvizsgálatokat végeztem el. A legjobb paraméter az össze próbatest esetében a 0,5 s hegesztési idő volt. A PA6 műanyag próbatesteknél ezzel a beállítással 9 MPa maximális nyírófeszültséget értem el. A 2 rétegű kompozitnál közel 25 MPa lett a maximális nyírófeszültség. A 4 rétegű kompozitnál a kevesebb mátrix anyag miatt 20 MPa-os maximális nyírófeszültséget és kisebb relatív nyúlást (1,5 %) sikerült elérni, mint a 2 rétegű esetben. Optikai mikroszkópos képek segítségével kiszámítottam a varrat tényleges felületét és ez alapján meghatároztam a korrigált nyírófeszültséget. Ezzel a módszerrel már kisebb különbség volt a hegesztési paraméterek között, így megállapítottam, hogy a hegesztési paramétereket úgy kell beállítani, hogy a hegesztett felületet maximalizálni tudjam. DSC vizsgálattal igazoltam, hogy a T-RTM-mel készített próbatestek nagyobb kristályos részaránnyal rendelkeznek, valamint a hegesztett részekben csökkent a kristályos részarány.

5.1. További megoldásra váró feladatok

További célom fröccsöntéssel készült PA6 mátrixú rövid szénszálas kompozit gyártása és ultrahangos hegesztése. Ezt pedig összehasonlítani a T-RTM-mel gyártott hegesztett kompozitok tulajdonságaival. Valamint érdemes lenne azt is megvizsgálni, hogy milyen hatása van annak, ha a próbatesteket hegesztés előtt szárítószekrényben szárítom, ezzel vizsgálva a nedvességtartalom hatását. Végül tervezem még TGA (Termogravimetriás analízis) méréssel meghatározni a különböző minták bomlási hőmérsékletét.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Anahi Pereira da Costa, Edson Cocchieri Botelho, Michelle Leali Costa, Nilson Eiji Narita, José Ricardo Tarpani: A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*, **4**, 255-265 (2012).
2. Agni K. Biswal, Ankush Nandi, Hung Wang, Aniruddh Vashisth: Ultrasonic welding of fiber reinforced vitrimer composites. *Composites Science and Technology*, **242**, (2023).
3. James J. Murray, Colin Robert, Klaus Gleich, Edward D. McCarthy, Conchúr M. Ó Brádaigh: Manufacturing of unidirectional stitched glass fabric reinforced polyamide 6 by thermoplastic resin transfer moulding. *Materials and Design*, **189**, (2020).
4. James J. Murray: Thermoplastic Resin Transfer Moulding of Tough Recyclable Composites for High Volume Manufacturing. The University of Edinburgh (2020).
5. Sina Ebnesajjad: Adhesives Technology Handbook. William Andrew, Norwich, NY (2009).
6. I. Jones: 10 – Laser welding of plastics. in ‘Handbook of Laser Welding Technologies’ (szerk.: Seiji Katayama) Woodhead Publishing, Sawston, Egyesült Királyság, 280-300 (2013).
7. Jordan Rotheiser: Joining of plastics. Handbook for designers and engineers, Hanser Publishers, München (1999).
8. Xu Cui, Lin Tian, Pu Zhao, Daosheng Wang, Yueyou Wang, Wei Wang: The morphology and mechanical property of hot gas implant welding joint of polypropylene. *Materials Letters*, **293**, (2021).
9. Vijay K. Stokes: A phenomenological study of the hot-tool welding of thermoplastics. Part 1: Polycarbonate. *Polymer*, **40**, 6235-6263 (1999).
10. P. Michel: An Analysis of the Extrusion Welding Process. *Polymer Engineering and Science*, **29**, 1376-1381 (1989).
11. Michael J. Throughton: Extrusion Welding. in ‘Handbook of Plastics Joining’ (szerk.: Michael J. Throughton) Elsevier, Amszterdam, Hollandia, 73-79 (2008).

12. Ghulam Anwer, Bappa Acherjee: Laser polymer welding process: Fundamentals and advancements. *Materials Today: Proceedings*, **61**, 34-42 (2022).
13. Ramesh Rudrapati: Effects of welding process conditions on friction stir welding of polymer composites: A review. *Composites Part C: Open Access*, **8**, (2022).
14. Somen K. Bhudolia, Goram Gohel, Kah Fai Leong, Aminul Islam: Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Review. *Materials*, **13**, (2020).
15. Michael J. Troughton: *Handbook of Plastics Joining*. William Andrew, Norwich, NY (2008).
16. L. Quintino: 2- Introduction to joining methods in medical applications. in 'Joining and Assembly of Medical Materials and Devices' (szerk.: Y. Zhou, Mark D. Breyen) Woodhead Publishing, Sawston, Egyesült Királyság, 28-46 (2013).
17. Qian Zhi, Xin-Rong Tan, Lei Lu, Long-Yang Chen, Jian-Cun Li, Zhong-Xia Liu: Decomposition of ultrasonically welded carbon fiber/polyamide 66 and its effect on weld quality. *Weld World*, **61**, 1017-1028 (2017).
18. Qian Zhi, Xin-Rong Tan, Zhong-Xia Liu: Effect of Moisture on the Ultrasonic Welding of CarbonFiberReinforced Polyamide 66 Composite. *Welding Journal*, **96**, 185-192 (2017).
19. Qian Zhi, Xin-Rong Tan, Zhong-Xia Liu: Effects of Preheat Treatment on the Ultrasonic Welding of Carbon-Fiber-Reinforced Polyamide 66 Composite. *Welding Journal*, **96**, 429-438 (2017).
20. Kaifeng Wang, Yang Li, Mihaela Banua, Jingjing Li, Weihong Guoc, Haris Khan: Effect of interfacial preheating on welded joints during ultrasonic composite welding. *Journal of Materials Processing Technology*, **246**, 116-122 (2017).
21. Yu-Hao Gao, Qian Zhi, Lei Lu, Zhong-Xia Liu, Pei-Chung: Ultrasonic Welding of Carbon Fiber Reinforced Nylon 66 Composite without Energy Director. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* (2018).

22. Keita Gotoa, Kenta Imaia, Masahiro Araia, Takashi Ishikawa: Shear and tensile joint strengths of carbon fiber-reinforced thermoplastics using ultrasonic welding. *Composites Part A*, **116**, 126-137 (2019).
23. Zsófia Osváth, Anita Szőke, Szabolcs Pásztor, László Balázs Závoczki, Györgyi Szarka, Béla Iván: Recent Advances in the Synthesis and Analysis of Polyamide 6 and Products Therefrom: From Polymerization Chemistry of ϵ -Caprolactam to Thermoplastic Resin Transfer Molding (T-RTM). *Academic Journal of Polymer Science*, **4**, 118-120 (2020).
24. Zsófia Kovács, Ákos Pomázi, Andrea Toldy: The flame retardancy of polyamide 6-prepared by in situ polymerization of ϵ -caprolactam-For T-RTM applications. *Polymer Degradation and Stability*, **195**, (2022).
25. Szebényi Gábor, Tamás-Bényei Péter, Ilya Sibikin, Tatyana Ageyeva, Osváth Zsófia, Pásztor Szabolcs, Iván Béla, Karger-Kocsis József, Czigány Tibor: ϵ -kaprolaktám alkalmazása T-RTM technológiákban. 'ERŐSÍTETT MŰANYAGOK 2018 Nemzetközi BALATON Konferencia, Balatonkerese, Magyarország' 988 (2018).
26. Michael Wilhelm, Rainer Wendel, Martin Aust, Philipp Rosenberg, Frank Henning: Compensation of Water Influence on Anionic Polymerization of ϵ -Caprolactam: 1. Chemistry and Experiments. *Journal of Composites Science*, **4**, (2020).
27. Zsófia Osváth, Anita Szőke, Szabolcs Pásztor, Györgyi Szarka, László Balázs Závoczki, Béla Iván: Post-Polymerization Heat Effect in the Production of Polyamide 6 by Bulk Quasiliving Anionic Ring-Opening Polymerization of ϵ -Caprolactam with Industrial Components: A Green Processing Technique. *Processes*, **8**, (2020).
28. Rainer Wendel, Bernd Thoma, Frank Henning: Influence of Water during Manufacturing of APA6 in the Thermoplastic RTM Process. 'Polymer Processing Society (PPS International Conference) 2017' (2017).
29. Jae Hyo Lee, Seung Mo Son, Jung Jae Yoo, Sang Woo Kim, Jin Woo Yi, Dong Gi Seong: Thermoplastic resin transfer molding of carbon fiber reinforced polyamide 6 composite with the improved processability using zeolite particle. *Korea-Australia Rheology Journal*, **35**, 39-45 (2023).

30. Bernard Miranda Campos, Serge Bourbigot, Gaëlle Fontaine, Fanny Bonnet: Thermoplastic matrix-based composites produced by resin transfer molding: A review. *Polymer Composites*, **43**, 2485-2506 (2022).
31. D. Dai, M. Fan: Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications. in 'Natural Fibre Composites' (szerk.: Alma Hodzic and Robert Shanks) Woodhead Publishing, Sawston, Egyesült Királyság, 3-65 (2014).
32. Nadlene Razali, Muhd Ridzuan Mansor, Ghazali Omar, Syed Ahmad Faiz Syed Kamarulzaman, Mohd Hanafee Zin, Nadia Razali: Chapter 15 – Out-of-autoclave as a sustainable composites manufacturing process for aerospace applications. in 'Design for Sustainability' (szerk.: S. M. Sapuan, Muhd Ridzuan Mansor) Elsevier, Amszterdam, Hollandia, 395-413 (2021).
33. Colin Gomez, Damiano Salvatori, Baris Caglar, Robin Trigueira, Gilles Orange, V'eronique Michaud: Resin Transfer molding of High-Fluidity Polyamide-6 with modified Glass-Fabric preforms. *Composites Part A*, **147**, (2021).
34. Róbert Boros, Ilya Sibikin, Tatyana Ageyeva, József Gábor Kovács: Development and Validation of a Test Mold for Thermoplastic Resin Transfer Molding of Reactive PA-6. *Polymers*, **12**, (2020).
35. Matthieu Thomassey, Baptiste Paul Revol, Frédéric Ruch, Julia Schell, Michel Bouquey: Interest of a Rheokinetic Study for the Development of Thermoplastic Composites by T-RTM. *Universal Journal of Materials Science*, **5**, 15-27 (2017).
36. Tatyana Ageyeva, Ilya Sibikin, József Gábor Kovács: A Review of Thermoplastic Resin Transfer Molding: Process Modeling and Simulation. *Polymers*, **11**, (2019).
37. Chan-Woong Choi, Ji-Won Jin, Haksung Lee, Mongyoung Huh, Ki-Weon Kang: Optimal Polymerization Conditions in Thermoplastic-Resin Transfer Molding Process for Mechanical Properties of Carbon Fiber-Reinforced PA6 Composites Using the Response Surface Method. *Fibers and Polymers*, **20**, 1021-1028 (2019).
38. Damiano Salvatori: Strategies for faster impregnation in melt thermoplastic resin transfer molding process. *Scientific production and competences*, (2018).

39. Orsolya Viktória Semperger, András Suplicz: The Effect of the Parameters of T-RTM on the Properties of Polyamide 6 Prepared by in Situ Polymerization. *Materials*, **13**, (2019).
40. Jungwoo Lee, Jun Woo Lim, Minkook Kim: Effect of thermoplastic resin transfer molding process and flame surface treatment on mechanical properties of carbon fiber reinforced polyamide 6 composite. *Inspiring Plastics Professionals*, 1-13 (2019).
41. Orsolya Viktória Semperger, Péter Pomlényi, András Suplicz: Felületi-bevonatolási eljárás T-RTM technológiához. *Polimerek*.
42. Colin Gomez, Damiano Salvatori, Baris Caglar, Robin Trigueira, Gilles Orange, V'eronique Michaud: Resin Transfer molding of High-Fluidity Polyamide-6 with modified Glass-Fabric preforms. *Composites Part A*, **147**, (2021).
43. Elodie Louisy, Fabienne Samyn, Serge Bourbigot, Gaëlle Fontaine, Fanny Bonnet: Preparation of Glass Fabric/Poly(L-lactide) Composites by Thermoplastic Resin Transfer Molding. *Polymers*, **11**, (2019).
44. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=75&l=m>
45. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=78&l=m>
46. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=119&l=m>
47. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=35&l=m>
48. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=32&l=m>
49. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=167&l=m>
50. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=129&l=m>
51. Orsolya Viktória Semperger, Zsófia Osváth, Szabolcs Pasztor, András Suplicz: The effect of the titanium dioxide nanoparticles on the morphology and degradation of polyamide 6 prepared by anionic ring-opening polymerization. *Polymer Engineering and Science*, **62**, 2079-2088 (2022).

7. MELLÉKLETEK

1. melléklet: irodalomból kigyűjtött hegesztési paraméterek ultrahangos hegesztéshez

Anyag	Erősítő tartalom	Amplitúdó	Frekvencia	Hegesztési energia	Hegesztési erő	Heg. idő	Max. heg. erő
CF/PA66	30 m%	25 μm	20 kHz	3000-8000 J	300 N	E. mód	6,4 kN
CF/PA66	30 m%	25 μm	20 kHz	3000 J	0,17 MPa	E. mód	6,3 kN
CF/PA66	30 m%	25 μm	20 kHz	-	-	E. mód	37 MPa
CF/PA6	30 m%	35 μm	20 kHz	400-1200 J	200 N	E. mód	3,5 kN
CF/PA66	30 m%	25 μm	20 kHz	Idő mód	0,13-0,2 MPa	1,3-3,3 s	6 kN
CF/PA66	30 m%	25 μm	20 kHz	Idő mód	0,13-0,18 MPa	1,3-3,3 s	5,2 kN
CF/PA6	50 tf%	90 μm	15 kHz	200-800 J	400 N	E. mód	40 MPa
CF/PA6T	50 tf%	-	20 kHz	-	0,4 MPa	0,5-0,6 s	3 MPa