

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



KLINCSELT KÖTÉSEK KÍSÉRLETI ÉS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

PhD értékezés tézisei

KÉSZÍTETTE:

JÓNÁS SZABOLCS

OKLEVELES GÉPÉSZMÉRNÖK

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ANYAGTUDOMÁNY ÉS MECHANIKAI TECHNOLOGIA TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

VADÁSZNÉ PROF. DR. BOGNÁR GABRIELLA

DSC, PROFESSZOR

TÉMACSOPORT VEZETŐJE:

PROF. DR. TISZA MIKLÓS

PROFESSOR EMERITUS

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

PROF. DR. TISZA MIKLÓS

PROFESSOR EMERITUS

Miskolc

2021

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG

Elnök:

Prof. Dr. Jármai Károly, Miskolci Egyetem, egyetemi tanár

Titkár és tag:

Dr. Marosné Prof. Dr. Berkes Mária, Miskolci Egyetem, egyetemi tanár

Tagok:

Prof. Dr. Czinege Imre, Széchenyi István Egyetem, Professor Emeritus

Dr. Mankovits Tamás, Debreceni Egyetem, egyetemi docens

Dr. Szűcs Máté, Miskolci Egyetem, tudományos munkatárs

HIVATALOS BÍRÁLÓK

Dr. Danyi József, Neumann János Egyetem, ny. főiskolai tanár

Dr. Szabó Ferenc János, Miskolci Egyetem, egyetemi docens

1. BEVEZETÉS

A disszertációmban a klincselés tématerületével foglalkozom. A klincselés az utóbbi időben egyre szélesebb körben a kutatások tárgya és egyre elterjedtebben alkalmazzák a gyártásban, bár maga a kötés szabadalma több, mint 100 éves. Ennek a fejlődésnek több szintje van.

Egyrészt a technológia alkalmazása során nincs szükség további kötőelemekre, ezáltal a gyártmány tömege csökken, ezzel az egyik fő alkalmazó iparág, az autógyártás szereplőinek fontos igénye teljesül, másrészt a környezetvédelmi előírások az EU-ban és világszerte is egyre inkább szigorodnak, ezeket a fejlődési trendeket is be kell tartani: a klincselés során nincs káros anyag kibocsátás, amely tulajdonság kedvez ezeknek a folyamatoknak. További fontos tulajdonság, hogy a gyártásban jól automatizálható, robotizálható eljárásról van szó, tekintve, hogy nagy sorozatban is kis hibával reprodukálható a kötés, így ezáltal olcsóbbá tehető az adott termék költsége, ráadásul az is fontos előnye, hogy a kötés létrehozása relatíve gyors.

Az ipari gyakorlatban fontos, hogy jól szabályozott eljárások, szabványok segítsék a mérnökök munkáját, és a klincselés területe jelenleg kevésbé ilyen, emiatt szükségessé vált a kutatások intenzitásának fokozása.

A kutatási szféra az ipar növekvő igényeire reagálva fokozta a klincs kötéssel kapcsolatos kutatásokat. Ugyanakkor fontosnak gondolom azt is megállapítani, hogy a kutatások eredményét, azok sikerességének mértékében az ipar is elkezdte a napi gyakorlatban alkalmazni. A két terület tehát jelentős mértékben összefügg. A kutatások az elmúlt nagyjából 20 évben egyre fejlettebb numerikus megoldásokat is alkalmaznak, ugyanis a számítási teljesítmény gyors fejlődésének köszönhetően elérhető közelségbe kerültek azok a bonyolult modellezési eljárások, amelyek eredményei korábban csak kísérleti úton voltak vizsgálhatók. A véges elemes számítások során az egyre bonyolultabb, összetettebb modellek segítségével egyre pontosabb képet kaphatunk a vizsgálat tárgyát képező folyamatokról. Meg tudjuk vizsgálni azokat a hatásokat is, amelyek elemzése kísérleti úton nehézkes, vagy rendkívül munka- és idő igényes.

Az anyagtudományi vonatkozás szükségszerűen szorosan kapcsolódik a modellezéshez, hiszen az anyagok viselkedésének matematikai leírásához ismernünk kell az alkalmazott anyagokat. Az anyagtörvények, sűrűlási viszonyok, tönkremeneteli módok matematikai leírása is egyre többre támaszkodik és egyre pontosabb, egyre inkább beépülnek a napi szimulációs tevékenységbe az alkalmazott szoftverek esetén. Bizonyos matematikai módszerek lehetővé teszik, hogy az anyagok és a geometria pontatlanságát valószínűségi alapon lehessen kezelni, így az optimalizációs folyamatok is ugrásszerűen felgyorsultak: ilyen például a robosztus tervezés elterjedése. Ennek a fejlődésnek köszönhetően a klincselő szerszámok kialakításának fejlesztése is gyorsabbá vált, és olyan variánsok kidolgozását is lehetővé tette, amelyek egyébként nem valósulhattak volna meg.

Mindezek ellenére az anyagvizsgálatnak is fontos szerepe van a fejlesztésekben, mivel a megfelelő anyagparaméterek ismerete nélkül nem tudnánk megalkotni a szükséges törvényeket, és az alkalmazott modell sem lenne megfelelő.

Ugyanakkor a két terület, a kísérlet és a modellezés, együttes alkalmazása a klasszikusnak tekinthető *trial-and-error* módszertant képes kiváltani úgy, hogy csökkennek a költségek

kísérletekre szánt összegek, továbbá az idő és munkaráfordítás is, mivel számos kérdést elég csak numerikusan vizsgálni ahhoz, hogy megbizonyosodjunk arról, miként fog viselkedni a gyártmány bizonyos körülmények között, és döntést tudjunk hozni a továbbiakban megteendő lépésekről.

1.1. Célkitűzések

A disszertációmban bemutatom a klincselés különféle eljárásait, és szeretném a kutatómunkám eredményeit a gyakorlati életben is hasznosítani. Kutatási eredményeim a mindennapi gyakorlati élet mellett, a műszaki számítások, méretezések területén is hasznosíthatók lehetnek.

A dolgozatomban szakirodalmi áttekintést végeztem a klincselés tématerületén. Röviden ismertetem a technológia helyét a kötéstechnológiák között, és rövid áttekintést adok a rokontechnológiákkal való kapcsolatáról. A dolgozathoz használt klincselési eljárás változattal részleteibe menően foglalkozom. Bemutatom az eljárás előnyeit és hátrányait, ismertetem a klincselés minőségbiztosítással kapcsolatos kérdéseit. A kötések egyik legnagyobb előnye a rokontechnológiákhoz képest, hogy viszonylag egyszerűen köthetők össze eltérő tulajdonságokkal rendelkező anyagok, így az eltérő anyagok kötési lehetőségeit is kutattam. A szakirodalomból ismert eljárás változatok bemutatása során szeretném érzékeltetni, hogy mennyire változatos, összetett és bonyolult maga a technológia.

A dolgozat két fő egységet képez, egyrészt a kísérleti munka, azok eredményeinek feldolgozása és a szükséges következtetések levonása, másrészt a végelelemes modellezéssel nyert eredmények, illetve azok értékelése. Ugyanakkor a két terület dolgozatomban szoros egységet képez, ezért egymással párhuzamosan kerülnek tárgyalásra a kifejezetten kísérleti eredmények szimulációval történő összevetésére vonatkozóak.

A végelelemes modellezés során vizsgálom a DP-s acélok kötéseit befolyásoló tényezőket, így például a súrlódást, a szerszámgeometriai jellemzőket.

A dolgozat célja, hogy a technológiát több szempontból is megismerve, elemezve ki lehessen dolgozni olyan eljárást, amelynek segítségével kismértékű módosításokkal a nagyszilárdságú acélhoz gyártott bélyeg és matrica felhasználható legyen alumínium ötvözetek kötéséhez úgy, hogy az alumínium ötvözetek közötti kötések a lehető legnagyobb szilárdságot ériék el.

Célul tűztem ki továbbá, hogy a szakirodalomban található heterogén anyagú kötések nyíró-szakító szilárdságának becslésére alkalmas összefüggést acél-alumínium vegyes kötésekre kiterjesztem, ugyanis a szakirodalom alapján jelenleg nincs ilyen összefüggés. Ehhez a szükséges mérések és számítások elvégzése után kerestem összefüggést.

A szakirodalomban a dinamikus kísérletek főként fáradással és a szakítási sebesség függéssel foglalkoznak. Jelen dolgozatban azonban az ütőmunka vizsgálata került a dinamikus vizsgálatok középpontjába. Korábban a szakirodalom alapján ezt más nem vizsgálta. Az ütővizsgálatok elvégzése alapján a kötés jószágát becsülni lehet, illetve az ütés irányának hatását elemezve kijelenthető, hogy irányfüggőség áll fenn.

A szakirodalom tanulmányozás során talákoztam az egyszerűsített modellezési lehetőségekkel, amely az ipari célú napi szintű hasznosulás egyik feltétele, így egy fejezetben kitérek ennek lehetőségére. Ennek az előnyös oldala, hogy a folyamat modellezése helyett a

kötések teherviselőképessége van a fókuszban, azaz a géptervezés ellenőrzési folyamataiban alkalmazható a módszer.

2. SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

A klincselés nem teljesen új technológia, hiszen az első szabadalmat 1897-ben adták be [1]. Az 1980-as évek végén kezdődött a kötéstechológia gyártásban történő alkalmazása. A lassúnak tekinthető fejlődés annak tudható be, hogy a klincselés több szempontból is bonyolult eljárás. Bonyolultság alatt értjük, hogy kevés kísérleti adat állt rendelkezésre, ezért összetett szerkezetek esetén kis pontatlanság is beláthatatlan következményekkel járhat. A szerszámokban történő kismértékű változtatás jelentős szilárdsági változást okoz a kötésben, ezen hatások vizsgálata kísérleti úton rendkívül költséges eljárás. Jelenleg is intenzíven folynak kutatások a témával kapcsolatban [3][4][5], ugyanakkor a kísérleteket manapság a numerikus vizsgálatok előzik meg, hiszen így jóval olcsóbban és gyorsabban juthatunk közelítő eredményre egy-egy változatot illetően. A véges elemek módszere segítségével lehet viszonylag egyszerűen vizsgálni a kötet. Kissé ellentmondásos lehet, hogy a jó modellhez ismerni kell a folyamat egészét, amelyhez kísérleteket kell végezni, azonban a szimulációk segítségével ennek ellenére is rövidíthető a *trial-and-error* szakasz a fejlesztési fázisban [8].

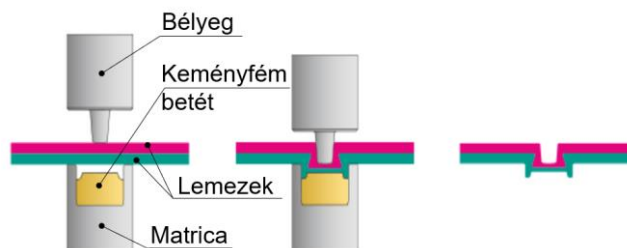
Az akadémiai kutatások kezdetét J. P. Varis [2] disszertációjához köthetjük. Azóta, és különösen az elmúlt néhány évben különféle megközelítésekben születtek disszertációk a klincseléssel kapcsolatban [8], [7] és [8] ez is jelzi, hogy fontos ipari alkalmazásról beszélünk. A lényegesnek tekinthető értekezések közül különösen kiemelkedő Coppieters [8] munkája. Anyagvizsgálati szempontból izgalmas tanulmány, továbbá analitikus módszerei kiváló alapot biztosítanak a további fejlesztésekhez. A klincseléshez kötődően Balawender könyve [9] számít mérföldkönek. A hazai kutatások közül pedig Tisza és munkatársai munkái emelendők ki [10], [11].

A klincs kötések alkalmazása vékony fémlemezek közötti kötések létrehozásában terjedt el leginkább, azonban néhány tanulmányban vastag lemezek kötésével is foglalkoztak, például [12]-ben. Az itt mért alakítóerők elérték a 800 kN-os terhelést is, a legnagyobb teljes lemezvastagság 12 mm volt.

A rokontechnológiáknak számító (ponthegeztés, szegecskötés, ragasztás) eljárásokkal szemben a klincselés során alapesetben tekintve nincs járulékos anyag, elem vagy hő felhasználás, hanem a szerszámok kialakításának következtében, helyi képlékeny alakváltozás hatására jön létre a kötés.

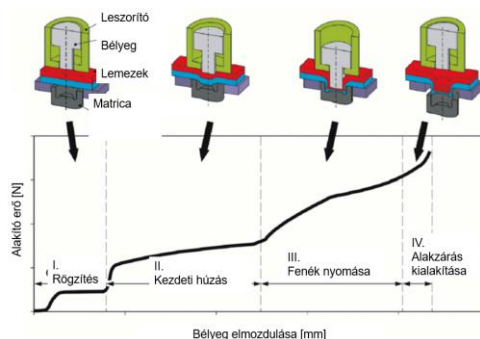
A szerszámozás egészen egyszerűnek tűnhet, egy bélyeg és matrica pár, és ráncgátló, de a kialakításuk és egymáshoz képesti geometriai és egyes esetekben a mozgásviszonyuk is meglehetősen összetett.

Az 1. ábrán az alapesetnek tekinthető körpont klincselés folyamatának sematikus ábrázolását láthatjuk. A folyamat során a bélyeget a matricába nyomjuk, majd a szerszámok eltávolítását követően a maradó alakváltozások okán, létrejön a klincselő kötés.



1. ábra Klincselés folyamata [13]

A folyamat során a különleges kialakítású szerszámok miatt a bélyeghez közelebbi (felső) lemez anyaga a matrica oldali (alsó) lemezbe áramlik, ezáltal kialakítva a kötés szempontjából legfontosabb alakzárást. A lemezek közötti súrlódás biztosítja az erőzárást, míg egyes esetekben (például hibrid kötések) anyagzárás is megvalósul, amely lényegesen növelni képes a teherviselőképeséget.



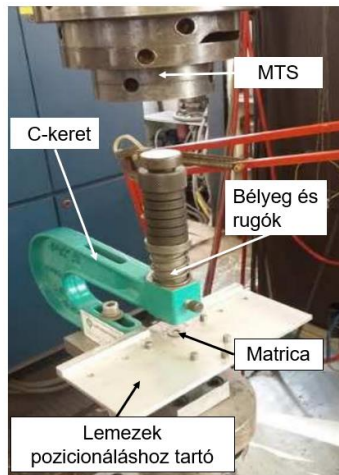
2. ábra Erő-elmozdulás (F-d) jelleggörbe [14]

A 2. ábrán a kötések jellegzetesnek tekintett erő-elmozdulás görbéje látható az alakítási folyamat egyes pillanataihoz kötve. Az első szakaszban a leszorító szerszámokra adott erő hatására a lemezek mozgása gátolttá válik. A disszertációban ezt a szakaszt elhanyagoljuk, ugyanis nincs jelentős hatása (néhány száz Newton erő ébred). A második szakaszban a lemezeket mélyhúzás szerű módon alakítjuk, és a II. szakaszban tiszta hajlítás állapotában vannak, egészen a lemezanyag megfolyásáig. A folyamat leegyszerűsítve elképzelhető, mint a hagyományos lemezalkatrészek mélyhúzása, de annál lényegesen összetettebb alakváltozási állapotban történik a kötés kialakulása. A II. szakasz elején az anyag még tisztán rugalmasan viselkedik, majd képlékenyen kezd el alakváltozni. Ez egészen addig a pillanatig tart, amíg az alsó lemez eléri a matricát. Ekkor lépünk a III. szakaszba, ahol a lemezpárt a matrica erre alkalmasan kialakított síkjára nyomjuk. A nyomás hatására az anyag radiális irányban kezd el áramlani. Mivel az anyag gátolva van a szabad áramlásban, ezért a matrica hornyába kezd folyni az alsó lemez, és követi a felső lemez is (IV. szakasz). Az anyag a matrica és bélyeg kialakításának függvényében kitölti a rendelkezésre álló szabad térfogatot, azaz létrejön a klincseltek kötés.

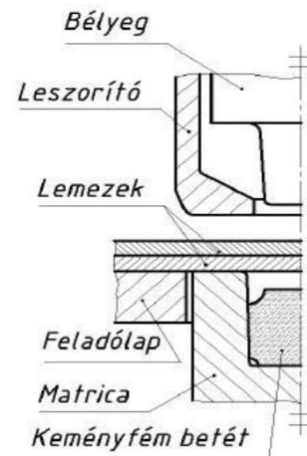
A diagram hiányossága, hogy nincs feltüntetve az V. szakasz, amely során eltávolítjuk a szerszámokat. Ekkor a jelleggörbében a leterhelési szakaszban megjelenik egy erőnövekmény, ami azt jelzi, hogy a bélyeget eltávolítottuk a kötésből. Az erő-elmozdulás görbén tagolt jellegzetes szakaszok az erő változásában is megjelennek. Az első jelentős változás a II. szakasz végén jelentkezik, mint egy meredekség változás, ami jelzi, hogy az alsó lemez elérte a matrica síkját. A III. szakaszt két alszakaszra lehet bontani, a lemezek tisztán

nyomás, illetve a nyomás következtében meginduló radiális alakváltozás alszakaszokra. A kötés kialakulásáért leginkább felelős IV. szakaszban látható, hogy kis elmozdulás hatására sokkal intenzívebb erőnövekedés történik, amit a horonyba való beáramlás okoz a lemezek anyagának felkeményedése során.

A kutatásaim során a Tanszék TOX gyártmányú körpont kötések létrehozására alkalmas szerszámával dolgozhattam. A szerszámot a 3. ábrán mutatom be, a C-keret az MTS 250 elektrohidraulikus egyetemes anyagvizsgáló gépre van szerelve. Egy vízszintes tálcát kapott kiegészítő elemként, amely a lemezek megfelelő elhelyezkedéséért felel. A 4. ábra mutatja a klincselő szerszám metszetét, illetve annak felépítését.

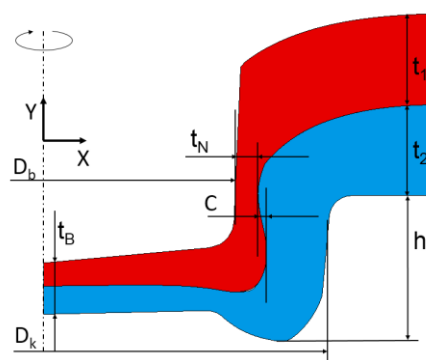


3. ábra Klincselő szerszám



4. ábra Klincs szerszám felépítése [11]

Az 5. ábrán látható a vizsgálat tárgyát képező körpont alakú kötés sematikus, tengelyszimmetrikus metszete a legfontosabb méretekkel jellemezve. A vizsgálatok során, a szakirodalomra alapozva a t_N , C és t_B méretek lettek figyelembe véve. A t_N a nyakvastagságot, a C az alámetszés méretét és t_B a maradó fenékvastagságot jelölik.



5. ábra Klincs kötés sematikus ábrázolása és jellemző méretei

3. KUTATÁS MÓDSZERTANA

A szakirodalmi feldolgozás során megismerkedtem a fontosabb vizsgálati módszerekkel és modellezési eljárásokkal. Ezt követően a saját kutatásaimhoz el kellett végezni a szükséges méréseket. Az értekezéshez kötődő kísérleti munkát a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék laboratóriumában végeztem. Az alkalmazott DP600 minőségű acél alapanyag összetételének vizsgálatához a Neumann János Egyetemen kaptam segítséget.

A dolgozat két fő részből áll, amelyek kapcsolódnak egymáshoz, a kísérleti munka és a szimulációs munka. Ez utóbbi munkához a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemtől kaptam támogatást az MSC.Marc&Mentat 2019 kutatói licence formájában.

3.1. Kísérleti módszerek

Az értekezésben a DP600 és az AA6082 anyagok vizsgálatára fókuszáltam. Ehhez kötődően egyrészt az alkalmazott anyagminőségek vizsgálatára is szükség volt a folyásgörbe felvétele miatt, másrészt a már létrehozott kötések statikus és dinamikus vizsgálatát is el kellett végezni.

A DP600 jelű nagyszilárdságú acélt több szempontból is vizsgáltam. Elsőként a szövetszerkeztét és vegyi összetételét elemeztem. A szövetszerkezt vizsgálatához a próbatest előkészítéséhez a próbatest csiszolása volt fontos, ehhez 100-200-600 és 1200 μm -es csiszolópapírt alkalmaztunk, majd 3 μm -es gyémántpasztával políroztuk, végül 3%-os Nitallal marattuk a felületet. Az így előkészített próbatestet egy Carl Zeiss mikroszkóppal vizsgáltuk, amelynek a képfelismerő szoftverével statisztikusan is értékeltük a mintákat.

A klincs kötések statikus vizsgálati elvben megegyeznek a ponthegeztett kötések vizsgálatával. Jelen vizsgálatokhoz alkalmazott lemezek $100 \times 30 \times 1 \text{ mm}^3$ méretűek voltak. A nyíró-szakító és nyakhúzó vizsgálatokhoz a próbatestek átfedése 30 mm volt. A fejhúzó vizsgálatokhoz a befogó szerszám csapjainak 16 mm átmérőjű furatok készültek.

A szakirodalomban a dinamikus vizsgálatok tárgyköre főként a statikus vizsgálatoknál alkalmazott próbatestekkel végzett nagyobb sebességű szakításokat [15] vagy a kifáradással kapcsolatos vizsgálatokat tárgyalja. Ütközésvizsgálatra, amelyben klincselte kötésekkel készített zártszelvényeket vizsgálnak a [16] tanulmányban találhatunk példát, míg vibrációs vizsgálatokról a [17] cikkben írnak. A kutatásaim során nem találkoztam klincselte kötésekre vonatkozó olyan kísérletekre, amelyeket Charpy-féle ütőművön végeztünk volna, ezért erre a módszerre esett a választás, annak ellenére, hogy nem szabványos próbatestekkel történt az alkalmazása. Az vizsgálatok során vizsgáltam az ún. normál és fordított irányú ütés hatását, amely vizsgálatok eredményéből jól látszik, hogy a fordított irányú ütés esetén ~15%-kal magasabb a kötés által elnyelt energia mennyisége. A járműipari alkalmazása során a járművek biztonságosabbá tehetőek már a tervezés során.

A kötések keresztmetszetén keménységméréseket végeztünk, amellyel az alakíthatóság mértékét lehet tanulmányozni, azaz milyen mértékben keményedik fel az alapanyag a gyártás során. A vizsgálatokhoz kisterhelésű Vickers féle keménységmérést választottunk (HV0,5, 500 grammos terhelés mellett). A keménységmérést DP600/DP600 és DP600/DP800 vegyes párosításokkal is elvégeztük.

A szakirodalom szerint a súrlódásnak fontos szerepe van a kötés létrejöttében, emiatt vizsgáltam a különböző kenési viszonyok mellett létrejövő kötések.

3.2. Szimulációs módszerek

Az értekezés másik, szerves részét képező rész a végeselemes modellezési eljárások útján történő vizsgálatok és azok eredményeinek ismertetése. Az értekezésben ez a két rész nem különül el teljesen egymástól, hanem a lehetőségek szerint egyszerre tárgyaltam. A modellezéshez MSC.Marc&Mentat 2019 általános célú végeselemes rendszert alkalmaztam.

A modellezés során arra törekedtem, hogy a kísérleti eredményekkel a lehető legjobban egyező modellt hozzam létre, ezáltal a kísérletekkel alá nem támasztott eredmények nagy valószínűséggel helyesek. Azaz a létrehozott modellel olyan numerikus vizsgálatokat is el lehetett végezni, amelyeket kísérleti úton nem, vagy csak nehézkesen lehetett volna vizsgálni. A modellezési eredmények közül az erő-elmozdulás diagramok és a kötés keresztmetszetére jellemző, a két összekötött lemez közötti felület által meghatározott geometria, amely „S” alakú diagramok formájában került bemutatásra, a legfontosabbak.

A modellezés során vizsgáltam a DP-s acélok és különböző hőkezeltégi állapotokban az AA6082 alumínium ötvözet viselkedését a kialakuló kötésgeometriára. A kísérleti úton is vizsgált súrlódás hatását szimuláció útján is elemeztem, és a vizsgálatokhoz hasonló eredményre jutottam.

Az értekezésben kitértem az egyszerűsített modellezési eljárások alkalmazhatóságának vizsgálatára. A három tipikusnak tekinthető vizsgálati módszer közül a nyíró-szakító és fejhúzó vizsgálatok esetét elemeztem. Összetett szerkezetek vizsgálatakor csökkenthető a számítási kapacitás és gyorsabban eredményre lehet jutni a megfelelő paraméterek ismeretében.

A szerszámok geometriájának hatását numerikusan elemeztem, azaz a bélyeg és a matrica főbb geometriai jellemzők változásának hatását a kötésre. A bélyeg geometriai hatását kísérleti úton is vizsgáltuk a Tanszéken gyártott szerszámok segítségével alumínium ötvözetek esetére. A modellezés eredményeit felhasználva meghatároztam egy lineáris összefüggést, amely segítségével becsülni lehet a kialakuló nyakvastagságot, mint a kötés szilárdságára jellemző paramétert. A szerszám geometria ismeretében becsülhetővé válik a kötés geometriája, azaz a kötés szilárdságára vonatkozó előzetes becslések adhatók. Összetettebb esetek vizsgálatával a szerszám geometriájának optimalítása lehetségessé válik.

Az értekezés fontos részét képezi a vegyes kötések létrehozása, és a közöttük fennálló kapcsolat vizsgálata. Eltérő vastagságú acélok között szimulációs úton, eltérő szilárdságú acélok és eltérő minőségű anyagok (acél és alumínium) között kísérleti és szimulációs úton is vizsgáltuk a kötések. Az eredmények alapján látható, hogy a vegyes anyagminőségű kötések esetén kedvezőbb, ha a nagyobb szilárdságú lemez, illetve vegyes vastagságú kötések esetén a vastagabb lemez van a bélyeghez közelebb. A feltárt összefüggések a tervezés során hasznosak lehetnek a tervezőmérnök számára.

4. TOVÁBBFEJLESZTÉSI ÉS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK

Az értekezés során több, a szakirodalom szerinti legfontosabb területet is vizsgáltam, annak érdekében, hogy a lehető legátfogóbb képet tudjam adni a kutatás során a klincselésről. Az erőforrások és a terjedelem azonban korlátozott, ebből kifolyólag számos területen a további vizsgálati lehetőség adott.

A dolgozatban nem foglalkoztam sem kísérleti, sem pedig szimulációs úton a szerkezetekben lévő klincselte kötések egymásra gyakorolt hatásáról, illetve üzemelő szerkezetekben való viselkedésükkel, így ezek mindenképpen olyan területek, amellyel a jövőben érdemes lenne foglalkozni. Az üzemelő szerkezetekben lévő klincselte kötések viselkedésének vizsgálata mind statikusan, mind pedig dinamikusán lehetséges jövőbeli kutatás témája lehet.

Az egyszerűsített modellezési eljárással foglalkozó fejezetben kidolgozott modellezési eljárás nyíró-szakító esetekre igaz. A továbbfejlesztési lehetőség ebből adódik, az eltérő irányú terhelési irányokra is érvényes modellezési módszer kidolgozása lehet cél. Az előző pontnak kiegészítő területe lehet az üzemelő szerkezetek modellezése során alkalmazott egyszerűsített klincselte kötések összetett terhelésekkel történő vizsgálata és kísérleti eredményekkel történő összevetése.

Az eltérő minőségű anyagok kötése során felállítottam a redukált szilárdságra vonatkozó összefüggést, amelynek segítségével a vizsgált acél és alumínium lemezek sorrendisége vehető figyelembe. Az eredmények szerint jó egyezéssel becsülhetők a kísérleti értékek mindkét sorrendre, azonban jelenleg más anyagpárral nem történt meg az összefüggés ellenőrzése, tehát más anyagpárok esetén is vizsgálni lehet az összefüggés alkalmazhatóságát. Az eredmények szerinti módosítása is elképzelhető. A szakirodalomban eltérő minőségekről sokkal tágabb értelemben találni eredményt, azaz nemcsak fém-fém kapcsolatot vizsgálnak, hanem például műanyag és fémköteket is elemeznek. A kutatások ilyen irányú kiterjesztése is hasznos eredményekre vezethet. Az eltérő vastagságú lemezek vizsgálata és kísérleti ellenőrzése segítségével alá lehet támasztani az értekezésben foglaltakat.

Az ipari hasznosíthatóság egyik lehetséges formája a munkahelyem kapcsán merül fel, a vasúti fékek légellátó rendszereit tároló keret szerkezetek alkalmazási területén. A klincselte kötések a jövőben kiválthatják a hegesztett kötésekét. A dolgozat írásakor ebben a kérdésben előrelépés még nem történt.

Az ütvizsgálatokból származó mérési adatokat fel lehet használni a járműiparban a kötések tervezésekor. A valószínű ütközési irányok alapján meghatározható a kedvezőbb irányultság.

Az egyszerűsített modellezési eljárás továbbfejlesztése az ipari gyakorlat számára szimulációs folyamatok során alkalmazható, ugyanis nagyméretű szerkezetekben alkalmazott, nagyszámú kötést viszonylag egyszerűen figyelembe lehet venni, ezáltal az adott szerkezetre vonatkozó számításokat lehet pontosítani.

Az egyik legígéretesebb terület a különféle szerelt autóiipari szerkezetek klincs kötéssel való egyesítése és e kötések vizsgálata.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az értekezésemben a klincselte kötések kísérleti és szimulációs kérdéseivel foglalkoztam.

Az értekezés megírását szakirodalmi kutatással kezdtem, és igyekeztem a legteljesebben feltérképezni a kötésről már rendelkezésre álló publikációkat. Az első fejezetben összefoglaltam a különféle klincselési változatokat, eljárás módokat és a modellezési eljárásokra vonatkozó megfontolásokat. Kitértem a minőségbiztosítási lehetőségek ismertetésére, illetve a folyamathoz szorosan kapcsolódó képlékenységtani háttérre is

Ezt követően a DP600 anyagminőséggel végzett kísérleti munkát és annak eredményét ismertettem. Ebben a fejezetben kitértem a Charpy-féle ütőmű egy újszerű alkalmazási módjára, amelyben sikerült bizonyítani, hogy a „fordított” irányú kötések nagyobb energiát nyelnek el ütközés során, mint a „normál” irányú kötések. Az optimális fenékvastagság megállapítását követően statikus vizsgálatokat végeztünk.

A kötések keresztmetszetén mikroszkópos és keménységmérési vizsgálatokat végeztünk. A csiszolatok és a regisztrált erő-elmozdulás diagramok felhasználásával a harmadik fejezetben kalibráltam a véges elemes modellt, amelyet a további különböző érzékenység vizsgálatokhoz alkalmaztam.

A szimulációs munka jó részét acélkötéseken végeztem, de az eltérő minőségű anyagok jó köthetősége okán alumínium alapanyaggal is dolgoztam. Az alumínium minőséget több hőkezelési állapotban is megvizsgáltuk, mind kísérleti, mind pedig szimulációs úton. A kísérletek eredménye szerint az oldó izzítást követő kikeményítési hőkezelés szükséges lépés a gyártási folyamat során, ugyanis a repedéseket okozó hajlam lényegesen lecsökken.

A DP600 anyagminőséggel végzett kísérleti eredményeket felhasználva egyszerűsített modellezési eljárást dolgoztam ki, amelyet további fejlesztések után ipari alkalmazásban is hasznosítani lehet.

Modellezéssel számos változó hatását vizsgáltam, így például a súrlódási tényező értékének befolyását. A súrlódási állapot hatását kísérleti úton is elemeztem, és hasonló eredményre vezetett, mint a szimulációs vizsgálat.

A szimuláció során alkalmazott anyagtörvényeket kísérletek eredményére illesztett közelítő függvényekkel írtam le, és vizsgáltam meg a kötések geometriai jellemzőin keresztül az egyes, gyakran alkalmazott módszerek közötti különbségeket.

A matrica geometriáját tisztán modellezési úton vizsgáltam, de a bélyeg geometriájának kötésre gyakorolt hatását kísérleti úton is. A bélyeg szimulációs eredményeit és a matematikai statisztika módszereit felhasználva felállítottam a bélyeg csúcspontja és kúposága közötti lineáris összefüggést, amely összefüggést alkalmazva jó közelítéssel meghatározható a várható nyak vastagsága, azaz áttételesen a nyíró-szakító teherbírásra vonatkozó becslés adható. További kutatást igényel, de az összefüggést tovább lehet fejleszteni akár az összes geometriai és anyagi változó figyelembevételével, és a kötés geometriájának optimalizálása is elvégezhető.

Megvizsgáltam modellezés útján, irodalmi adatok alapján az eltérő szilárdságú DP-s acélok kötésre gyakorolt hatását. DP600/DP800 párosítás esetén, kísérlet úton is vizsgáltam a heterogén acélok kötését.

Klincselte kötések kísérleti és szimulációs vizsgálata

Az eltérő anyagok kötése során acél és alumínium anyagokat használva végeztünk kísérleti és szimulációs vizsgálatokat, amely eredmények felhasználásával a kötés nyíró-szakító erő becslésére alkalmas összefüggést kibővítettem.

Az értekezésem több eredményét is hivatkozták egy klincselés végeselemes modellezési lehetőségeivel foglalkozó összefoglaló tanulmányban [18].

Budapest, 2021.december

Jónás Szabolcs
okleveles gépészmérnök

6. TÉZISEK ÉS ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- T1.** Chapry-féle ütőművön végzett dinamikus vizsgálatokkal igazoltam, hogy az ütközésszerű dinamikus behatásokkal szemben DP600 minőségű acélkötés esetén az ún. „fordított” kötések ~15%-kal nagyobb ellenállást biztosítanak az ún. „normál” irányhoz képest. A jelenség magyarázata az ütközés során lejátszódó zömítésszerű alakítási folyamat [JSz 1], [JSz 2], [JSz 9], [JSz 11].
- T2.** 2D-s tengelyszimmetrikus végeelem modell segítségével vizsgáltam a klincselte kötések befolyásoló tényezőket, és kimutattam, hogy
- a. az anizotrópia és visszarugózás hatása DP600-as minőségű acélok esetén elhanyagolható mértékű [JSz 3],
 - b. az alámetszés fejhúzás-szerű terhelések esetén arányban áll a kigombolódáshoz tartozó erővel, és lineáris kapcsolatot mutat a fenékvastagsággal, tehát a maradó fenékvastagság arányban áll a teherviselőképességgel a DP600-as minőséggel végzett szimulációk alapján [JSz 18],
 - c. AA6082 alumínium kötések esetén a hőkezeltiségi állapot hatását kísérleti és szimulációs úton is igazoltam [JSz 14], [JSz 16],
 - d. igazoltam, hogy vegyes anyagminőségű kötések esetén kedvezőbb, ha a nagyobb szilárdságú lemez, illetve vegyes vastagságú kötések esetén a vastagabb lemez van a bélyeghez közelebb [JSz 12].
- T3.** Kísérleti és szimulációs úton igazoltam, hogy a tribológiai viszonyok hatással vannak a DP600 minőségű acélból készült kötések szilárdságára, úgymint
- a. a kisebb súrlódás a lemezpárok között nagyobb alámetszést (~15%) biztosít, amelynek hatása a fejhúzó jellegű terhelések során mértékadó,
 - b. a súrlódásnak kismértékű hatása (~5%) van a nyakvastagságra, amely a nyíró-szakító jellegű terhelések szempontjából kritikus [JSz 12].

- T4.** Egyszerűsített nyíró-szakító klincselt kötésmodellezési eljárást dolgoztam ki DP600 minőségű acélokhoz. Az egyszerűsített modell változóinak helyes megválasztásával más anyagokra is kiterjeszthető. Ipari alkalmazhatósága ezáltal biztosítható [JSz 17], [JSz 18].
- T5.** DP600 és AA6082 vegyes kötésekre érvényes, a nyíró-szakító teherbírást becslését lehetővé tevő összefüggés kiegészítését írtam fel, amely az ún. redukált szilárdsággal veszi figyelembe a lemezek sorrendiségét [JSz 14]

$$R_{m,red.} = \begin{cases} \frac{R_{m,t1}+R_{m,t2}}{2}, & \text{ha } R_{m,t1} > R_{m,t2} \\ R_{m,t1} \cdot \frac{R_{m,t1}}{R_{m,t2}}, & \text{ha } R_{m,t1} < R_{m,t2} \end{cases}.$$

- T6.** Felállítottam egy lineáris modellt, amellyel a kötésre jellemző nyakvastagság értékét lehet becsülni AA6082 alumínium anyagra eltérő csúcs sugarú és kúpszögű bélyeg esetére [JSz 16]

$$t_{N,be\acute{c}s\ddot{u}lt} = 0,127 + 0,016\alpha + 0,098R.$$

7. ÉRTEKEZÉSHEZ KÖTŐDŐ PUBLIKÁCIÓK

- [JSz 1] Jónás Sz., Tisza M., Felhős D. (2017) *Clinching of High Strength Steels – Test and Simulation*, NAFEMS World Congress 2017, Stockholm
- [JSz 2] Jónás Sz., Tisza M. (2017) Clinching of DP600 steel sheets, Bodzás S., Mankovits T. (szerk.), Proceedings of the 5th ISCAME, p. 6
- [JSz 3] Jónás Sz., Tisza M. (2018) *Finite element Modelling of Clinched Joints*, Advanced Technologies & Materials 43: 1, p. 6
- [JSz 4] Jónás Sz., Tisza M. (2018) *Klincs kötések vizsgálata kísérleti és szimulációs úton*, International Journal of Engineering and Management Sciences 3:1 pp. 80-86
- [JSz 5] Jónás Sz., Tisza M. (2018) *Klincs kötések minőségi kérdései*, International Journal of Engineering and Management Sciences 3:5, p. 6
- [JSz 6] Jónás Sz., Tisza M. (2018) *Use of Surface Response Methodology (RSM) in Clinching Process*, Design of Machines and Structure 7:1 pp. 23-31
- [JSz 7] Jónás Sz., Tisza M. (2018) *Influencers of Clinched Joints*, Kékesi T. (szerk.) Multiscience XXXII. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, p. 8, Miskolc
- [JSz 8] Jónás Sz., Tisza M. (2018) *Numerical Investigation of Clinched Joints*, Materials Science and Engineering: A Publication of the University of Miskolc, 43:1, pp. 62-70
- [JSz 9] Jónás Sz., Tisza M. (2018) *Experimental Study on DP600 Clinched Joints*, Metallurgy and Foundry Engineering, 44:1, pp. 31-40
- [JSz 10] Jónás Sz., Tisza M. (2018) *Determination of Different Parameters of High Strength Steel Clinch Joints by FEA*, Mankovits T. (szerk.), Proceedings of the 6th ISCAME, p. 6
- [JSz 11] Jónás Sz., Tisza M. (2019) *Charpy Impact Test on Clinched Joints*, Mankovits T. (szerk.), Proceedings of the 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2019) - poster
- [JSz 12] Jónás Sz., Tisza M. (2019) *Effect of Friction Coefficient on Clinched Joints*, Mankovits T. (szerk.), Proceedings of the 7th ISCAME
- [JSz 13] Jónás Sz., Kovács P. Z. (2019) *Effect of Punching Tool Geometry on Clinched Joints*, Mankovits T. (szerk.), Proceedings of the 7th ISCAME
- [JSz 14] Jónás Sz., Tisza M., Kovács P. Z., Felhős D. (2019) *Experimental and Numerical Study of Dissimilar Sheet Metal Clinching*, AIP Conference Proceedings 2113
- [JSz 15] Jónás Sz., Tisza M., Kovács P. Z. (2019) *Klincs kötések vizsgálata*, Multidiszciplináris Tudományok, 9: 4, pp. 115-124
- [JSz 16] Jónás Sz., Kovács P. Z. (2020) *Klincs kötések kísérleti és szimulációs vizsgálatai – A bélyeg geometriájának hatása a kötésekre*, GÉP 61 : 1, pp. 35-39
- [JSz 17] Jónás Sz., Tisza M. (2021) *Klincselte kötések egyszerűsített modellezése*, Multidiszciplináris Tudományok, 11. kötet. 4 sz. pp. 309-317
- [JSz 18] Jónás Sz., Tisza M., Kovács P. Z. (2021) *Klincselte kötések vizsgálatának egyszerűsített modellezési lehetőségei*, VI. Gépészeti Szakmakultúra Konferencia, Budapest, ISBN 978-963-9058-44-6

8. TÉZISFÜZETBEN FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Deutsches Reichspatent (1897) DRP-No. 98517
- [2] J. P. Varis (2000) *A novel procedure for establishing clinching parameters for high strength steel*, Lappeenranta University of Technology. PhD disszertáció
- [3] P. Kaczynski, M. Skwarski (2020) *Partial heating as a new method for increasing the strength of clinch joints of thin-walled element*, Thin-Walled Structures 148. 106610
- [4] C. Chen et al. (2020) *Research on the mechanical properties of repaired clinched joints with different forces*, Thin-Walled Structures, vol. 152. 106752
- [5] M. Paidar et al. (2020) *Development and characterization of dissimilar joint between AA2024-T3 and AA6061-T6 by modified stir clinching process*, Vacuum, vol. 176., 109298
- [6] M. K. Sabra (2017) *Clinching of AA7075 Aluminum Sheets*, McMaster University. PhD disszertáció
- [7] C. Chao (2018) *Investigation of two-steps clinching process for joining aluminium alloy sheets*, Tokushima University, PhD disszertáció
- [8] S. Coppieters (2012) *Experimental and numerical study of clinched connections*, KU Leuven, PhD disszertáció
- [9] T. Balawender et al. (2015) *Technological Aspects of Manufacturing and Numerical Modelling of Clinch-Adhesive Joints*, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology – Computational Mechanics
- [10] Tisza M. et al. (2014) *Alakítható nagyszilárdságú lemezanyagok klincs kötése*, Multidiszciplináris tudományok, 4. kötet, I. sz. pp. 49-58.
- [11] Kovács P. Z., Tisza M. (2016) *Klincs kötés technológiai paramétereinek vizsgálata. végelelemes modellezéssel*, Anyagmérnöki Tudományok, 39/1 pp. 7-18.
- [12] R. Neugebauer et al. (2013) *Clinching in steel and railway construction. shipbuilding and commercial vehicles*, Journal of Production Engineering 16. No.1. pp.63-68
- [13] <https://us.tox-pressotechnik.com/applications/clinching/clinching-point-shapes/tox-round-joint/> (felkeresve: 2020. 11. 21.)
- [14] J. Mucha (2017) *Clinching technology in the automotive industry*, The Archives of Automotive Engineering –Archiwum Motoryzacji. 76(2): 75-94. <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL.76.ART4>
- [15] Y. Ge, Y. Xia (2019) *Dynamic behaviour of self-piercing riveted and mechanical clinched joints of dissimilar materials: an experimental comparative investigation*, Advances in Materials Science and Engineering vol. 2019, Article ID 6463576, 12 p
- [16] Z. Gronostjski, S. Polak (2009) *The application of clinching techniques to join impact energy-absorbing thin-walled aluminium section*, Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 54. Iss. 3. pp. 695-703
- [17] X. Ge et al. (2015) *Vibration measurements of clinched joints*, Procedia CIRP 26 pp. 208-211
- [18] Qin, D. et al. (2021) *Finite element methods used in clinching process*, Int J Adv Manuf Technol, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07602-5>