VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LEPENÉ HYBRIDNÍ SPOJE V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

BONDED HYBRID JOINTS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Jan Ševčík**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Jaroslav Kubíček**
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Jan Ševčík**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Jaroslav Kubíček**
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Lepené hybridní spoje v automobilovém průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Moderní metody hybridního spojování jsou v konstrukci karoserie automobilů stále používanější. Jedná se o tepelné procesy spojování v kombinaci s lepením, kdy se současně využívá primárních výhod obou technologií.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracování literární studii se zaměřením na výrobu karoserií.
2. Zhodnocení současného stavu a výběr optimální metody svařování a lepení pro stavbu karoserie.
3. Návrh a doporučení pro zpracování experimentální části.
4. Zpracování experimentu a technického hodnocení.
5. Formulování závěrů a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

FISCHER,J. Loctite, Worldwide Design Handbook. 2. vyd. Mainz: Erasmusdruck GmbH.1998. 452s. ISBN 0-96 5590-0-5.

OSTEN, Miloš a Josef MLEZIVA. Práce s lepidly a tmely. Praha: Grada, 1996. Profi & hobby. ISBN 80-7169-338-3.

ŠTRKAŇ, Jan, KUBĚNA, Jiří a Petr, BRIŠ. Lepení v praxi. Praha Grada, 2017. ISBN 978-80-2-1-0247-1.

Loctite - Průmyslová lepidla a tmely, http:// www.loctite.cz, přístup 10.října 2017

Sika CZ, produkty a řešení , http:// www.cze.sika.com, přístup 10.října 2017.

ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

KOUKAL, Jaroslav a kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, Oldřich a kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. 2., upr. vyd. Ostrava ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

TURŇA, Milan. Špeciálne metódy zvárania, 1vyd. Bratislava: ALFA, 1989. ISBN 80-05-000097-9.

BARTÁK, Jiří a kolektiv autorů. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

ONDREJČEK, Peter. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1. vyd. Bratislava: ETERNA PRESS, 2003. ISBN 80-968359-5-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá lepenými hybridními spoji, které se používají při spojování dílů moderních karoserií. Práce nejprve obecně popisuje postup výroby celé karoserie od stříhání polotovarů až po její povrchovou úpravu, včetně rozboru používaných materiálů. Následně je rozebrána problematika spojování dílů karoserie pomocí lepidel, ale i spojování svařováním, pájením či jinými metodami. Další část této práce se věnuje experimentu, při kterém se zjišťovaly vlastnosti lepených hybridních spojů. Byly provedeny různé způsoby realizace spoje, které se lišily ve velikosti lepené plochy, v použitých svařovacích metodách a v postupu jejich vytvoření. U zhotovených spojů se zkoumala jejich pevnost a kvalita jejich provedení.

Klíčová slova

lepené hybridní spoje, lepení, lepidla, metody spojování karoserie

ABSTRACT

This diploma thesis deals with bonded hybrid joints which are used for connecting parts of modern coachwork. Firstly, the thesis describes in general the process of production of the whole coachwork, from cutting of the blanks to the surface treatment including the analysis of the used materials. Subsequently, the problem of joining body parts through adhesives, but also by welding, soldering or other methods is discussed. Another part of this thesis is dedicated to an experiment in which the qualities of bonded hybrid joints were determined. Different ways of realizing the joint have been made which differed in the size of the glued surface, in the welding methods and in the process of their creation. The produced joints were tested for their strength and quality.

Key words

bonded hybrid joints, gluing, glues, coachwork joining methods

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEVČÍK, Jan. *Lepené hybridní spoje v automobilovém průmyslu.* Brno, 2018. 57s, 2 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Lepené hybridní spoje v automobilovém průmyslu** vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

Datum

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za veškerou podporu a umožnění vysokoškolského studia.

OBSAH

ABSTRAKT
PROHLÁŠENÍ
PODĚKOVÁNÍ
OBSAH
ÚVOD 10
1 VÝROBA KAROSERIE 11
1.1 Karoserie osobních automobilů 11
1.2 Materiály pro karoserie osobních automobilů 12
1.2.1 Ocel 12
1.2.2 Hliník a jeho slitiny 14
1.2.3 Hořčík a jeho slitiny 15
1.2.4 Kovové pěny 15
1.2.5 Plasty 16
1.3 Popis výroby karoserie 16
1.3.1 Tváření 16
1.3.2 Spojování dílů 17
1.3.3 Povrchová úprava 18
2 SVAŘOVÁNÍ, PÁJENÍ A LEPENÍ DÍLŮ KAROSERIE 20
2.1 Lepené hybridní spoje 20
2.2 Svarové spoje 20
2.2.1 MIG/MAG 21
2.2.2 CMT 22
2.2.3 Odporové svařování 23
2.2.4 Laser 24
2.3 Pájené spoje 27
2.3.1 MIG pájení 28
2.3.2 Laserové pájení 28
2.4 Lepené spoje 29
2.4.1 Princip lepení 29
2.4.2 Rozdělení lepidel 33
2.4.3 Konstrukce lepených spojů 35
2.4.4 Postup lepení 36
3 NÁVRH A DOPORUČENÍ PRO ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTU 37
3.1 Volba materiálu 37

4 ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTU 38
4.1 Typy provedení spojů 38
4.2 Postup spojování vzorků 40
4.3 Trhací zkouška 44
4.4 Hodnocení kvality spojů 51
ZÁVĚR 57
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK
SEZNAM OBRÁZKŮ
SEZNAM TABULEK
SEZNAM PŘÍLOH

ÚVOD

Lidstvo je v dnešní době velmi závislé na dopravních prostředcích, zejména automobilech. Dříve si koupě a provoz automobilu mohli dovolit jen zámožní lidé, dnes se tento způsob dopravy však stává čím dál tím více dostupnější. Téměř každá rodina vlastní automobil a není již výjimkou, když disponuje dvěma či více automobily. S rostoucí poptávkou po automobilech se zvyšuje potřeba je vyrábět, a to co nejekonomičtěji a nejrychleji. Při výrobě automobilů je tedy nutné používat a vyvíjet nové technologie, které toto umožňují.

Karoserie je, vedle pohonu, jedna z nejdůležitějších částí automobilu. Je to základní prvek vozidla, ke kterému se připevňují ostatní části, jako jsou podvozek, hnací soustava, sedačky pro cestující a ostatní příslušenství. Co do hmotnosti, je karoserie nejtěžší částí automobilu. Zvolením vhodných materiálů, vhodným konstrukčním řešením karoserie či vhodným spojováním dílů karoserie lze ovlivnit hmotnost, tuhost a bezpečnost celé karoserie.

Důležitý je také ekologický a ekonomický provoz vozidla. Snížením hmotnosti karoserie lze docílit snížení potřebného výkonu motoru a tudíž snížení spotřeby paliva. Hmotnost karoserie lze snížit úpravou konstrukce nebo použitím moderních materiálů, jako jsou např. vysoko-pevnostní oceli, hliníkové slitiny, kompozity, plasty, aj.

Výhodné je použití kombinace dílů z různých materiálů. Nastává však problém, jak tyto díly spolu spojit, aby pevnost celé sestavy byla vyhovující. Nabízí se hned několik způsobů provedení spoje. Lze použít klinčované, šroubové či nýtové spoje. Nehodí se však pro spojování dílů na pohledových místech. Další možností je využít svarové, pájené nebo lepené spoje. Svarové spoje jsou výhodné tím, že dosahují vysoké pevnosti. Nevýhodou je fakt, že při svařování dochází k negativnímu tepelnému ovlivnění okolí spoje či k narušení korozní odolnosti povlakovaných plechů. Pájení je možno použít pro spojování stejných, ale i rozdílných materiálů, např. hliníkových slitin s ocelí. Nehrozí zde již tak veliké tepelné ovlivnění, nevýhodou je však nižší pevnost spoje. Lepené spoje vynikají vysokou pevností nebo tlumícími a těsnícími vlastnostmi. Nevýhodou je, že lepené povrchy musí být velmi čisté či vhodně upravené k lepení a své pevnosti dosahují až po vytvrzení. Použitím lepení v kombinaci s výše uvedenými metodami vznikne lepený hybridní spoj, který využívá výhod obou technologií. Může tak vynikat vysokou pevností, tlumícími či těsnícími vlastnostmi atd.

1 VÝROBA KAROSERIE [1]

Karoserie se v dnešní době nachází na vysoké úrovni a to z hlediska tvaru, použitých materiálů, bezpečnosti a i způsobu výroby. Jednotlivé díly a celky jsou konstruovány a projektovány nejmodernějšími počítačovými metodami a technologiemi. Rychlost a kvalita výroby se zvyšuje začleněním automatických výrobních linek.

1.1 Karoserie osobních automobilů [1], [2]

Karoserie je základní prvek automobilu, který má za úkol chránit před vnějšími vlivy posádku, náklad a jednotlivé části vozidla. Ukládá se do ní hnací a převodová soustava, ale i ostatní vnější a vnitřní vybavení vozidla. Karoserie je konstrukčně a technologicky náročný výrobek a musí splňovat řadu důležitých požadavků, jakými jsou např. pevnost a tuhost, vysoká životnost, kvalitní těsnost, uspokojivá aerodynamika a estetika. Z důvodu jízdní dynamiky vozidla a z důvodu snižování emisí, tudíž snižování spotřeby paliva, musí být karoserie co nejlehčí. Je také nutné, aby karoserie disponovala prvky aktivní i pasivní bezpečnosti, mezi které patří dobrý výhled z vozidla, jízdní komfort, dostatečné deformační zóny, snadné vyproštění cestujících při nárazu, snížení rizika požáru, apod.

Požadavky na lehčí a bezpečnější vozidla nutí výrobce používat moderní vysokopevnostní oceli v kombinaci s lehkými neželeznými kovy a plasty. Tento trend přináší vývoj nových výrobních metod v oblasti tváření, spojování, ale i v povrchových úpravách karoserie. Díky pestrému využití automobilů se vyrábí mnoho typů karoserií, viz tab. 1.

Tab. 1 Různé provedení karoserií automobilů [2].

Typ karoserie	Popis	Schéma automobilu
Hatchback	- strmá záď automobilu - pěti/tří dveřové provedení - výklopný celý zavazadlový prostor	
Sedan	- stupňovitá záď - oddělený zavazadlový prostor - dvě řady plnohodnotných sedadel	
Liftback	- výklopné celé páté dveře - oproti Hatchbacku delší záď - závěsy 5. dveří umístěny u střechy	
Kupé	- 2 boční dveře - jedna až dvě řady sedadel - snížená střecha v zadní části vozidla	
Kabriolet	- sklopná nebo odnímatelná střecha - 2-4 boční dveře - pevné sloupky u předního skla	
Kombi	- pěti dveřové provedení - zvětšený vnitřní i zavazadlový prostor - sklopná nebo vyjímatelná zadní sedadla	
SUV	- obyčejně pohon obou náprav - větší výška vozidla - velký vnitřní prostor	

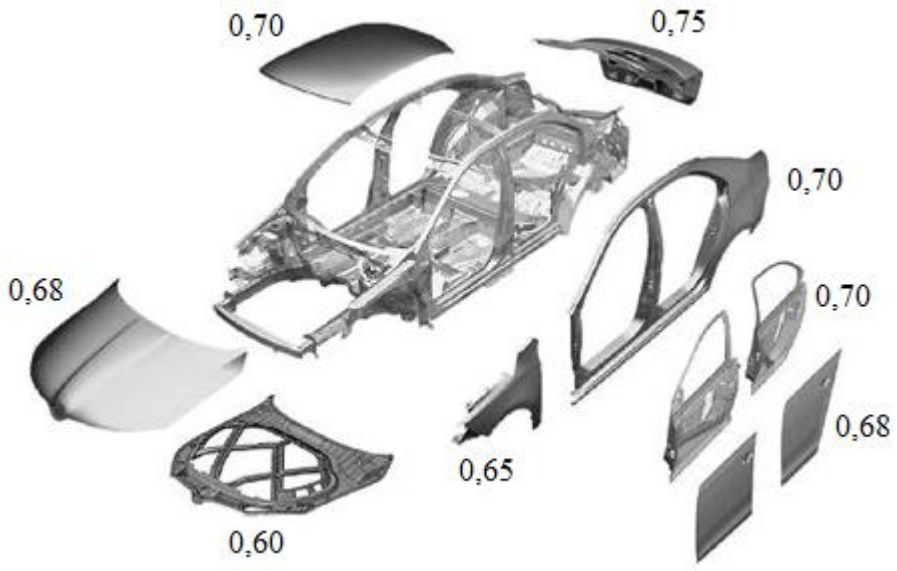
1.2 Materiály pro karoserie osobních automobilů [2]

Na výrobu karoserie automobilů se používá mnoho různých materiálů. Na tyto materiály jsou kladeny vysoké požadavky. Vnější díly karoserie jsou především designového charakteru a je tak zapotřebí, aby vykazovali při výrobě dostačující plasticitu nebo je bylo možné tvarovat do různě složitých tvarů. Vnitřní skelet automobilu je zhotoven z pevnějších materiálů, protože musí odolávat vysokému únavovému namáhání i korozi. Volba materiálu závisí na jeho ceně, hmotnosti a v neposlední řadě i na technologičnosti výroby.

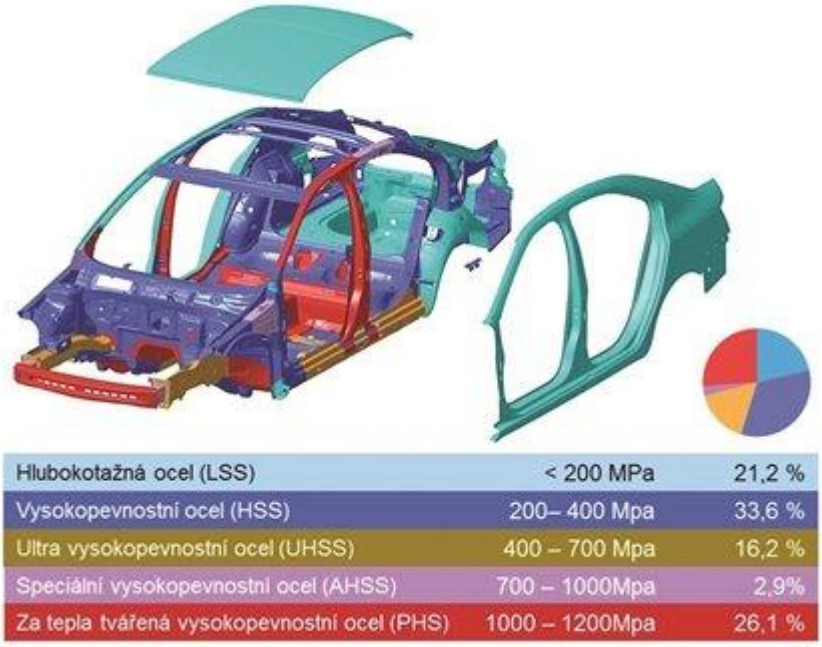
1.2.1 Ocel [2], [3], [4], [5], [6]

Nejběžnějším materiálem je ocel. Její přednosti jsou vysoká pevnost a snadná tažnost, možnost spojování svařováním či pájením, dostatečná životnost po antikorozní úpravě, ale také její příznivá cena.

Používají se ocelové plechy dodávané v tabulích, pásech a svitcích. Další používané polotovary jsou ocelové trubky (rámy, výztuhy, součásti kování), uzavřené a otevřené profily, tažené plné profily, odlitky a výkovky (součásti dveří). Nevýhodou ocelí je jejich hmotnost. Dá se snížit např. optimalizací tloušťky plechů, viz obr. 1, nebo použitím vysoko-pevnostních ocelí, ze kterých se vyrábějí bezpečnostní prvky karoserie, viz obr. 2.



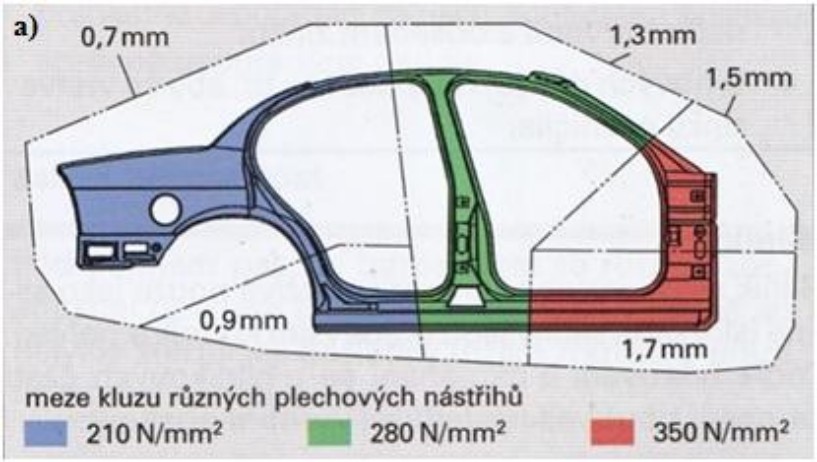
Obr. 1 Tloušťky plechů [mm] – Škoda Octavia III [3]

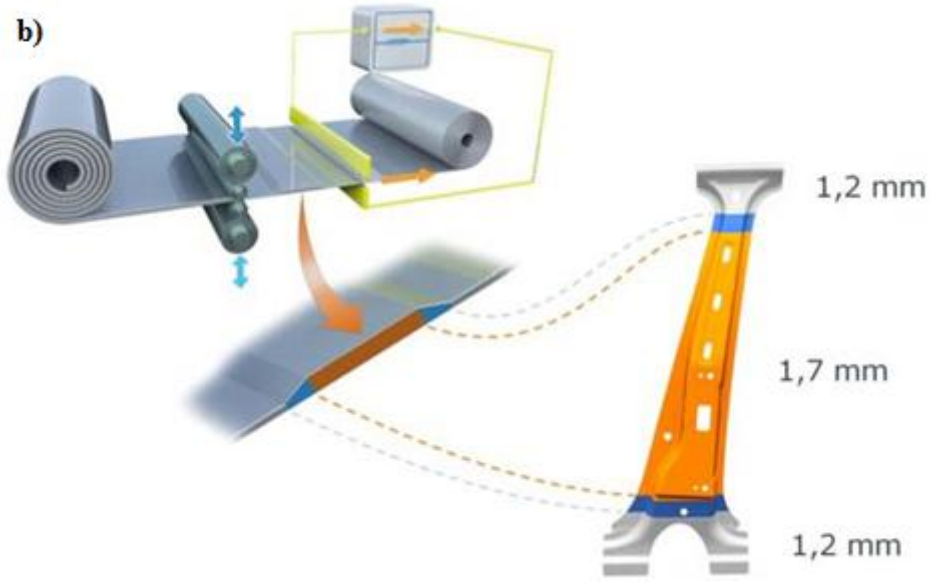


Obr. 2 Materiálový koncept karoserie modelu ŠKODA Octavia III [3]

Další možnost snížení hmotnosti přináší metoda ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body), která přináší snížení hmotnosti až o 25 %. Princip metody spočívá v uzavření umělé hmoty (polypropylenu) mezi dva tenké plechy o tloušťce 0,2 - 0,65 mm. Ocelové plechy přenášejí hlavní namáhání, zatímco polypropylenová výplň zvyšuje celkovou tuhost dílu. Karoserie vyrobené touto technologií odolávají až o 80 % lépe namáhání krutem a o 52 % lépe namáhání ohybem.

Dalším způsobem, jak snížit hmotnost karoserie z ocelových plechů, je použití technologie Tailored blanks. Tato technologie využívá lisování svařence, který je sestaven z různých druhů ocelí s různou tloušťkou, pevností a povrchovou úpravou, viz obr. 3. K vytvoření svařence se využívá švové nebo laserové svařování. Díky této technologii se využívá speciálních vlastností a tloušťky materiálu pouze tam, kde je to potřeba. Sníží se tak hmotnost dílu a dojde ke zvýšení jeho tuhosti a zlepšení deformačních vlastností při nárazu. Vysoká cena speciálních nástrojů a vysoké náklady na provoz svařovacích i ostatních strojů předurčuje technologii Tailored blanks pouze pro velkosériovou výrobu, kde je zajištěna rentabilita.





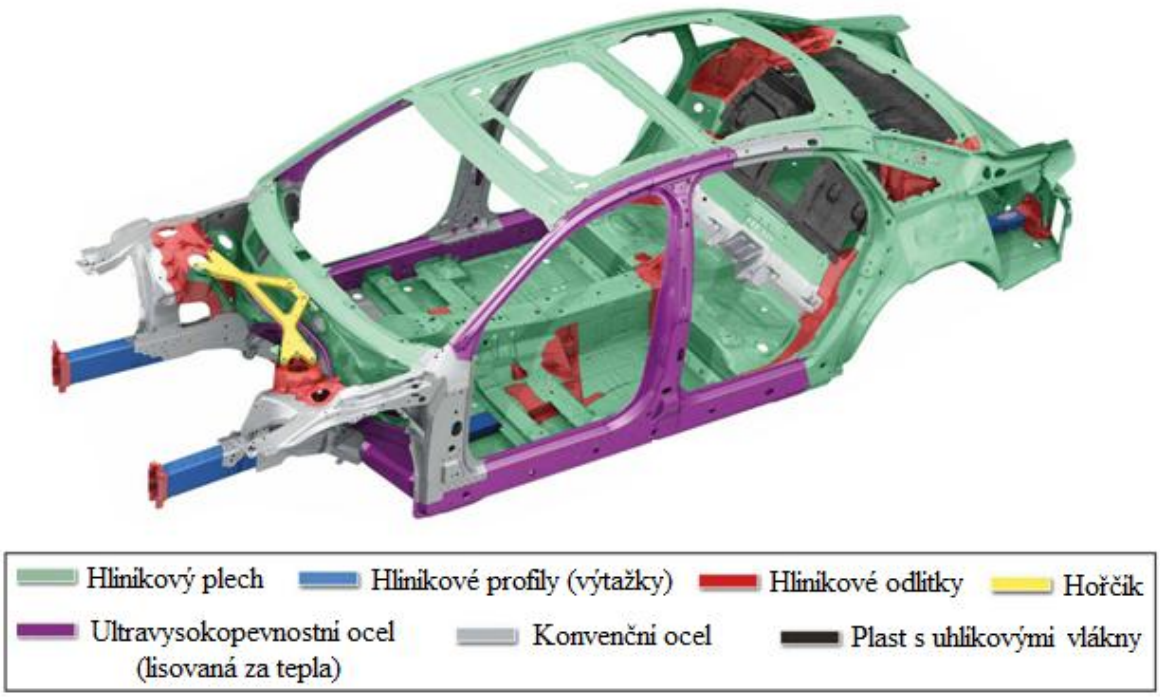
Obr. 3 Využití technologie Tailored blanks při výrobě a) vnějšího boku karoserie b) B-sloupku [5], [6]

1.2.2 Hliník a jeho slitiny [2], [7], [8]

Velmi významným lehkým kovem používaným pro výrobu karoserie je hliník a jeho slitiny. Karoserie složená z hliníkových a ocelových dílů může mít až o 30 - 40 % menší hmotnost než celoocelová, přestože se kvůli menší pevnosti hliníku musí použít silnější plechy. Jelikož má hliník malý modul pružnosti, malou tvarovou pevnost i malou absorpci nárazové energie, používají se raději na více namáhané součásti karoserie vysokopevnostní oceli, které tyto nedostatky v porovnání s hliníkem nemají. Běžně se dnes používají hliníkové plechy s mezí kluzu 250 MPa, vyvíjejí se však plechy s mezí kluzu i 400 MPa. Výhodou hliníkových dílů je jejich odolnost vůči korozi, která se eloxováním ještě zvyšuje. Další výhodou je jejich snadná tvařitelnost, která snižuje výrobní náklady. Cena hliníku je však mnohem vyšší než oceli, zhruba 3x. Proto je výhodné kombinovat hliníkové díly s ocelovými či jinými materiály. Může však nastat problém s jejich spojováním svařováním či pájením. Lze se jim však vhodnými opatřeními vyhnout a provést kvalitní spoj.

Hliníkové karoserie se vzhledem ke své vyšší ceně používají častěji u luxusnějších a dražších automobilů. Např. karoserie Audi A8 je více jak z poloviny tvořena hliníkovými díly, viz obr. 4.

Významnými výrobci hliníkových karoserií či jejich komponent jsou automobilky Audi, Mercedec, BMW, Jaguar-Land Rover, Ford, General Motors a Toyota.



Obr. 4 Složení rámu z více materiálů – Audi Space Frame pro A8 IV. Generace [7]

1.2.3 Hořčík a jeho slitiny [9]

Hořčík a jeho slitiny mají při výrobě karoserií stále větší zastoupení. Hořčík se, v porovnání s hliníkem a ocelí, vyznačuje nízkou měrnou hmotností a vysokou měrnou pevností. Dobře tlumí vibrace, pohlcuje rázy a je snadno recyklovatelný. Nevýhodou je však jeho špatná odolnost vůči opotřebení, nízká pevnost při vyšších teplotách a vysoká náchylnost k elektrokorozi při kontaktu s většinou kovů. Tyto nevýhody lze však eliminovat zvolením vhodné slitiny či povrchové úpravy.

1.2.4 Kovové pěny [9], [10]

Jedná se o porézní materiál, který je složen nejčastěji z hliníku a jeho slitin. Hliníkové kovové pěny se vyznačují poměrně vysokou tuhostí, tlumící schopností a dobrou pohltivostí nárazové energie. Hliník jim dále propůjčuje dobrou houževnatost a korozní odolnost. Vyrábí se vytvořením plynových bublin v tavenině a jejím následným ztuhnutím. Naplynění taveniny lze docílit třemi metodami. Přidáním tuhého polotovaru obsahující zpěnovadlo, vháněním plynu do taveniny nebo tepelným rozkladem přimíchaného zpěnovadla. Kovové pěny se používají v odlehčených konstrukčních dílech, např. v deformačních zónách karoserií (prahy, sloupky, aj.), viz obr. 5.

Obr. 5 Výztuha prahů automobilů Ferrari z pěnového hliníku ALULIGHT [9]

1.2.5 Plasty [2], [8]

V konstrukci automobilů se čím dál více začínají používat plasty. Existuje jich řada druhů a používají se na výrobu nejrůznějších dílů karoserie, např. kapoty, nárazníky, blatníky a především díly ve vnitřním vybavení karoserie, viz tab. 2. Plastové díly se vyrábí především vstřikováním, vakuovým tažením nebo lisováním. Výhodou plastů je jejich nízká hmotnost, poměrně vysoká pevnost a pružnost, dobré tlumení hluku, odolnost vůči korozi, snadná výroba, příznivá cena apod. Nevýhodou je však jejich zdlouhavá výroba, obtížná oprava a velmi špatná absorpce nárazové energie. Jejich běžnější použití však komplikuje otázka jejich ekologické likvidace a recyklovatelnosti jednotlivých dílů po konci životnosti vozu.

Tab. 2 Druhy plastů a jejich použití v automobilech [2].

Materiál (zkratka)	Název plastu	Příklad použití
ABS	kopolymer akrylonitril-butadied-styren	vnitřní vybavení, kryty kol
EP	epoxidové pryskyřice	kompozity
PA	polyamidy	pouzdra, ovládací prvky
PC	polykarbonát	kryty elektro, skla světel
PE	polyethylen	tepelné izolace
PP	polypropylen	nárazníky
PP/EPDM	PP modifikovaný kaučukem	nárazníky
PU Pu-RIM, PU-PRIM, PU-TPU	Polyuretany - reakčně vstřikovaný, zesílený, termoplastický	nárazníky, držadla, izolace, sedáky, přístrojové desky
PVC	polyvinylchlorid	vnitřní koženky
UP	nenasycený polyester	malosériové díly karos., opravy
PS, SB	polystyren, styren-butadien	ovládací prvky v interiéru
PBTP	polytereftalát	ovládací prvky v interiéru
PF	fenolformaldehydová pryskyřice	elektroskříňky
MF	melanimformaldehydová pryskyřice	elektrosoučásti

1.3 Popis výroby karoserie [1]

Většina dílů karoserie je v současné době tvořena ocelovými popř. hliníkovými plechy nebo profily. Plechy se dodávají ve svitcích, ze kterých jsou stříhány do polotovarů, kterým se pak na lisech dává konečný tvar. Jednotlivé díly pak putují do svařovny, kde je roboti svaří nebo i jiným způsobem spojí dohromady. Celá karoserie pak postupuje do lakovny, kde se nejprve očistí od všech nečistot a nanese se na ni několik vrstev barvy a laku. Po vytvrzení a kontrole povrchové úpravy putuje karoserie na montáž, kde se spojuje s hnacím ústrojím a montuje se do ní ostatní vybavení.

1.3.1 Tváření [11]

Jelikož je celá karoserie složena z mnoha různorodých dílů a několika materiálů rozličných vlastností, tak i tvářecí metody jsou různě odlišné. Hlubokotažná ocel se tváří za studena, vysoko-pevnostní ocel pak za studena, ale i za tepla. Z důvodu vyšší pevnosti roste odpružení po tváření a je také nutná větší síla lisu k přetvoření, díky ohřevu lze však tyto problémy zmírnit. Ohřev je prováděn v průchozích, komorových, indukčních nebo karuselových pecích, popř. kontaktním ohřevem. Při tváření za tepla je lisovaný díl řízeně ochlazován a vzniká tak v různých místech různá struktura, tudíž i různé mechanické

vlastnosti, které jsou žádoucí. Pro tváření se používají hydraulické lisy nebo servolisy. Hliník a jeho slitiny lze tvářet za studena nebo za poloohřevu a je jej možné, tak jako ocel, tvářet kapalinou – hydroforming. Různé profily lze vyrábět protlačováním. Plastové díly se vyrábějí na vstřikovacích lisech.

1.3.2 Spojování dílů [1], [7], [12], [13]

Díly z lisovací linky putují do svařovny, kde jsou tyto díly sestavovány do skupin, např. podlaha, střecha, dveřové sloupky, dveře, zadní víko, kapota apod. Tyto skupiny se posléze spojují v celek karoserie. S rozvojem nových materiálů karoserií a vyššími nároky na pevnost a estetiku spojů se musely vyvíjet i nové spojovací metody. V dnešní době se tedy karoserie spojují např. svařováním (MIG/MAG, laserové, odporové, CMT, třecí), pájením (MIG, laserové, CMT), lepením, klinčováním (prolisováním) nebo pomocí nýtů či šroubů aj., viz obr. 6.

Obr. 6 Různé metody spojování karoserie [7]

Výhodou svařování je výborná a okamžitá pevnost spoje a možnost snadné automatizace. Nevýhodou je však tepelné ovlivnění materiálu v okolí svaru a nevhodnost pro spojování některých odlišných materiálů např. ocel – plast apod.

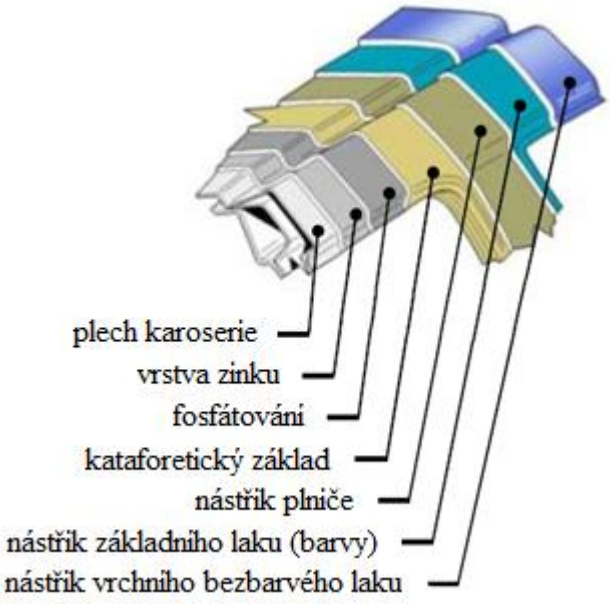
Při pájení dochází již méně k tepelnému ovlivnění materiálu a nedochází tak např. u spojování pozinkovaných plechů ke ztrátě korozní odolnosti. Pájením je také možné spojovat různé kovové materiály, např. ocel – hliník. V porovnání se svařováním se však musí počítat s nižší pevností spoje.

Při klinčování či spojování pomocí nýtů a šroubů nebo lepením nedochází k žádnému tepelnému ovlivnění materiálu. Šrouby, nýty nebo lepením lze spojovat různé materiály např. ocel – plast apod. Kromě lepení se tyto spoje však nedají použít na pohledová místa. Lepení a svařování je výhodné tím, že je napětí rozloženo téměř rovnoměrně po celé ploše spoje. Nýty a šrouby jsou koncentrátory napětí, které je pak v takovýchto spojích velmi nerovnoměrně rozloženo, viz obr. 7. Kombinací lepení a dalších metod spojování vznikají hybridní spoje, které využívají výhody těchto metod.

Obr. 7 Rozložení napětí při různých metodách spojování [12]

1.3.3 Povrchová úprava [2], [6], [14], [15], [16]

Aby se zachovaly požadované vlastnosti kovů v průběhu životnosti automobilu, je nutné provést antikorozní úpravu celé karoserie. Povrchová úprava karoserie se skládá z několika vrstev, viz obr. 8. Celý proces je velmi složitý a než jím celá karoserie projde, trvá to několik hodin.



Obr. 8 Jednotlivé vrstvy povrchové úpravy karoserie [6]

Po spojení všech dílů na svařovně putuje karoserie do lakovny. Před samotným nanášením laku předchází úprava povrchu odmaštěním a fosfátováním. Během fosfátování je celá karoserie ponořena do lázně, kde se na ní nanese 5 μm vrstva krystalického zinkofosfátu. Zvýší se tak korozní odolnost a zlepší se přilnavost dalších vrstev.

V další fázi je nanášen kataforetický základ, který zajistí karoserii velmi dobrou antikorozní ochranu. Opět se provádí ponořením celé karoserie do lázně. Tloušťka vrstvy se pohybuje od 15 μm do 20 μm. Antikorozní ochrana ocelových dílů je však prováděna ještě před jejich vyrobením a to použitím pozinkovaných plechů s tloušťkou povlaku 8 -10 μm.

Po vypálení kataforetického základu v peci se provádí utěsňování spojů těsnícími materiály na bázi PVC (polyvinylchloridu), které zajišťují vodotěsnost a odhlučnění karoserie. Zvláštní pozornost je věnována podvozkové a podlahové části karoserie, kde se nanáší PVC plastizoly ve vrstvě až několika desetin milimetru.

V následující fázi se elektrostaticky nanáší vodou ředitelný plnič, který vyrovnává drobné nerovnosti vzniklé při výrobě. Jeho tloušťka je přibližně 35 μm. Pro dosažení požadovaných vlastností je opět nutné nechat tuto vrstvu usušit v peci.

Dále se již nanáší barevný podklad, který dává karoserii finální barevný odstín, viz obr. 9. Jeho tloušťka je 15 - 25 μm, která se odvíjí od toho, zda jde o metalickou či klasickou barvu.

Jako nejvrchnější vrstva je nanášen bezbarvý lak o tloušťce 35 - 45 μm. Po jeho rovnoměrném nanesení zasychá v peci při teplotě okolo 140°C. Lak dodává karoserii vysoký lesk a zlepšuje ochranu proti vnějším vlivům např. UV záření, solím, kyselým dešťům apod.

Posledním krokem antikorozní ochrany karoserie je konzervace dutin. Ta je zajištěna zaplavením horkým voskem o teplotě 120°C.

Během procesu se provádí několik kontrol kvality povrchu, které zjišťují, jestli je karoserie bezvadně nalakována. Z lakovny pak karoserie míří na montáž, kde je do ní montován pohon a ostatní příslušenství.

Obr. 9 Nanášení finálního odstínu karoserie pomocí robotů [14]

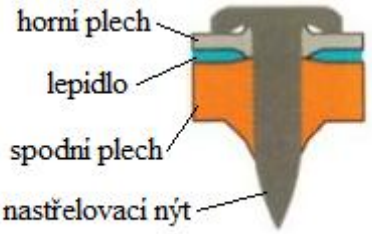
2 SVAŘOVÁNÍ, PÁJENÍ A LEPENÍ DÍLŮ KAROSERIE

V technické praxi se používají rozmanité způsoby spojování strojních dílů. Je možno je rozčlenit do dvou hlavních skupin, rozebíratelná a nerozebíratelná. Nerozebíratelná spojení, tzn. bez použití rozebíratelných členů, je možné vytvořit např. lepením, svařováním a pájením. Mezi rozebíratelná spojení patří např. šroubová spojení.

2.1 Lepené hybridní spoje [13]

Lepený hybridní spoj je takový, kde je použita technologie lepení spolu s další metodou spojování např. svařováním, pájením, nýtováním, šroubovým spojem apod., viz obr. 10. Využívá se výhod obou spojovacích metod. Výše uvedené metody mají výbornou pevnost, přidáním lepidla lze pevnost a tuhost spojované sestavy ještě zvýšit, utěsnit je, snížit riziko vzniku koroze v místě spojení apod.

Hlavní předností tohoto spojení je snížení hmotnosti výsledného produktu. Hybridní spoje se dnes hojně využívají v automobilovém a leteckém průmyslu.



Obr. 10 Hybridní lepený spoj [13]

Výhody hybridních spojů:

- zvýšení celkové pevnosti a tuhosti spoje díky kombinaci lepení a svarového, pájeného, nýtového či jiného spoje
- při ztrátě funkčnosti jednoho typu spoje je stále aktivní druhý typ spoje
- rovnoměrné rozložení napětí ve spoji
- okamžitá vysoká počáteční pevnost spoje díky svarovému, pájenému, nýtovému aj. spoji
- možnost spojovat nové materiály
- výborný tlumící efekt
- korozní odolnost spoje, kdy lepidlo brání vzniku elektrochemické korozi
- snížení sklonu k odlupu a plastickému tečení zásluhou svarového, pájeného, nýtového aj. spoje

2.2 Svarové spoje [5], [17], [18]

Svařováním kovů se vytváří nerozebíratelné spoje prostřednictvím koncentrovaného tepla nebo tlaku. Spojované plochy jsou v plastickém či roztaveném stavu a díky působení meziatomových sil dojde ke spojení obou částí. Některé metody využívají přídavný materiál, některé jej však nepotřebují a ke svaření využívají pouze základního materiálu. V praxi se používá mnoho metod svařování, každá má své výhody a nevýhody, své limity, které je nutné zohlednit při jejím výběru pro danou aplikaci. Pro svařování karoserií automobilů je však nejvhodnější svařovací metoda MIG, MAG, svařování elektrickým odporem nebo laserem.

Při svařování karoserií se většinou svařují tenké plechy o tloušťce cca 0,5 - 2 mm. Je tedy nutné, aby použitá metoda umožňovala svaření takto tenkých plechů za předpokladu vyhovující pevnosti svarového spoje či dobrého povrchového vzhledu. Množství různých svarových spojů, které je nutno pro jednu karoserii vyrobit, ukazuje tab. 3.

Tab. 3 Množství svarů a jiných spojů na jednotlivých modelech automobilů Škoda [3].

Metoda svařování	Množství	Octavia I	Fabia I	Superb	Octavia II	Roomster
bodové svary	ks	4 400	4500	6201	5000	5217
MIG pájení	m	-	4	7,4	2,5	2
MAG svařování	m	5,5	1	1,2	2,5	7,5
přivařování svorníku	ks	190	160	214	200	161
výstupkové svařování	ks	25	46	147	31	34
laserové pájení	m	-	1	1,03	1,6	1,2
laserové svařování	m	-	-	3,06	0,5	-

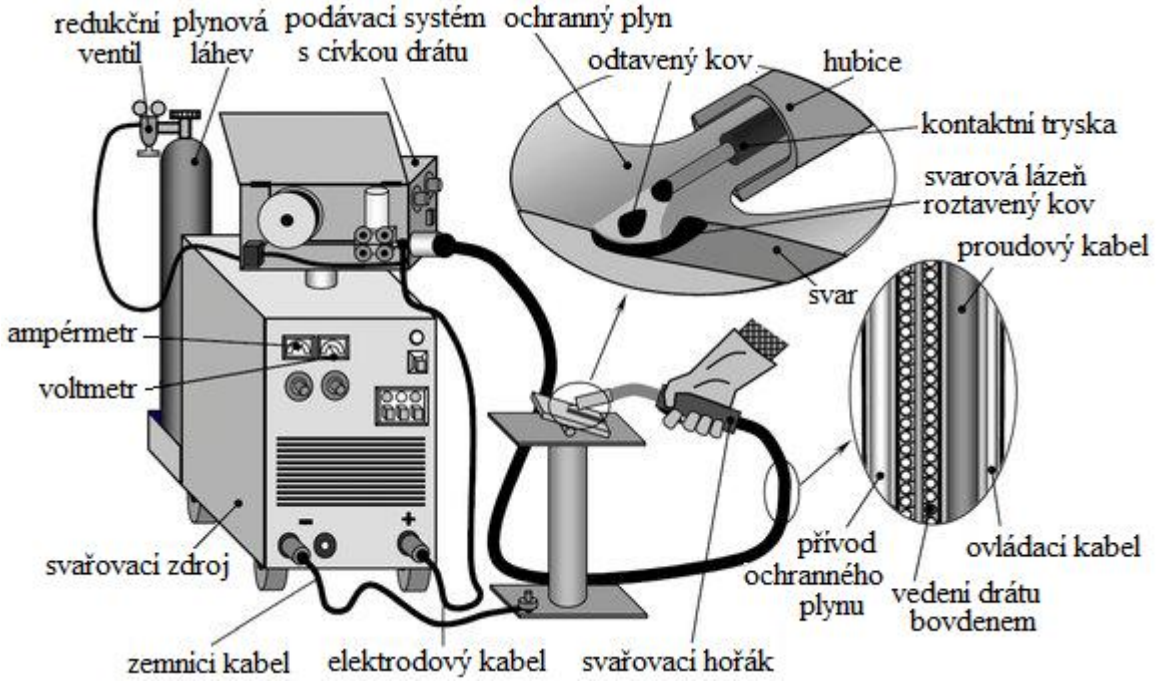
2.2.1 MIG/MAG [17], [19], [20], [21], [22]

MIG (Metal Inert Gas) a MAG (Metal Active Gas) jsou metody obloukového svařování, kdy dochází k hoření oblouku mezi základním materiálem a elektrodou (drátem) v ochranné atmosféře plynu. Tento plyn obklopuje místo svaru a chrání elektrodu, natavené kapky přídavného materiálu, oblouk a tavnou lázeň proti působení vzdušného kyslíku či dusíku, které způsobují oxidaci, pórovitost, naplynění a propal prvků.

U metody MIG plní inertní ochranný plyn pouze funkci ochrannou, nepodílí se tedy na žádných chemických reakcích s roztaveným kovem. Naopak u metody MAG je ochranný plyn aktivním, podílí se tudíž na chemických reakcích v tavné lázni. Jako inertní plyny lze použít např. argon, helium či jejich směsi. Jsou vhodné pro všechny kovy kromě oceli, především pro měď, hliník a nikl. Jako aktivní plyny se používají směsi argonu a kyslíku nebo oxidu uhličitého. Jejich použití je zejména pro svařování nerezových a vysokolegovaných ocelí, ale také pro svařování nízkolegovaných či nelegovaných ocelí.

Zařízení pro svařování MIG/MAG metodou je zobrazeno na obr. 11. Přídavný drát (elektroda) je namotán v zásobní cívce a pomocí soustavy posuvových kladek je automaticky podáván do místa svaru. Je nositelem oblouku a k jejímu napájení elektrickým proudem dochází v ústí trubice v tzv. kontaktní trysce. Charakter přenosu kapek kovu obloukem je závislý na ochranném plynu a na svařovacích parametrech. Pro svařování tenkých plechů je obvyklý zkratový charakter a sprchový pro větší tloušťky materiálu.

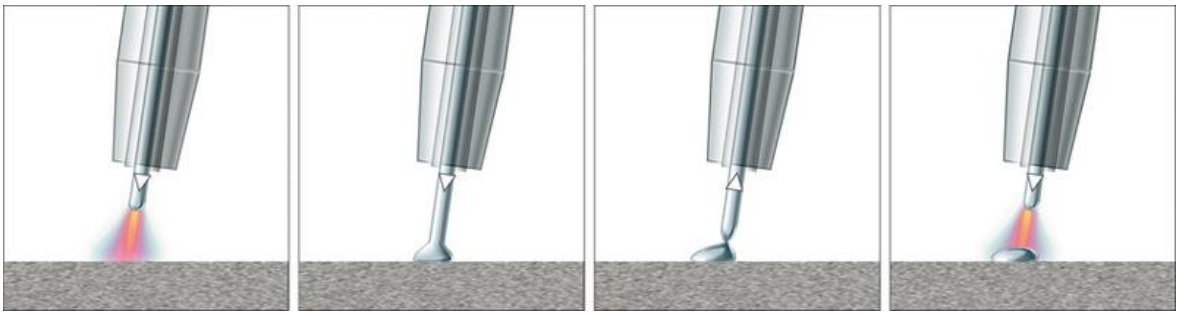
Výhodou metod MIG/MAG je možnost svařovat ve všech polohách, minimální tvorba strusky, úspora nedopalků díky dlouhému přídavnému drátu, hluboký závar, malá tepelně ovlivněná oblast zejména při vysokých rychlostech svařování, vysoká proudová hustota, stabilní plynová ochrana, nízká pórovitost svarů, téměř žádný rozstřik kovu přídavného drátu a v neposlední řadě možnost použití na robotizovaných pracovištích.



Obr. 11 Zařízení pro MIG/MAG svařování [20]

2.2.2 CMT [23], [24]

Technologie CMT (Cold Metal Transfer) se vyvinula z technologií MIG/MAG, přechod materiálu zde však probíhá při mnohem nižší teplotě. Proces využívá zkratový oblouk se speciálním uvolňováním kapky roztaveného kovu elektrody. Během svařování nedochází pouze k posuvu přídavného drátu dopředu, dochází však i k jeho kmitavému pohybu. Pokaždé, když dojde ke zkratu, poklesne svařovací proud a drát se zatáhne proti směru posuvu, čímž podpoří uvolnění kapky roztaveného kovu. Posléze se opět vysune a nastává nový zkrat, viz obr. 12. Tento děj se opakuje až 90 krát za sekundu. Díky tomuto procesu hoří oblouk pouze okamžik a vnáší tak do materiálu jen malé množství tepla. Jelikož nelze docílit vysokofrekvenčního kmitavého pohybu pohybem cívky s přídavným drátem, vkládá se do transportní hadice vyrovnávací člen, tzv. pufer, který toto kmitání drátu umožňuje.



Obr. 12 Pohyb drátu při svařování metodou CMT [23]

Výhodou této metody je možnost uskutečnit spoje ocel-hliník nebo ocel-hořčík, bezrozstřikové pájení povlakovaných plechů, svařování tenkých až 0,3 mm tenkých plechů. Chlubí se také vysokou stabilitou celého procesu svařování.

V případě spojování hliníku s ocelí dochází, za přítomnosti ochranného plynu, k tavení základního hliníkového materiálu a přídavného materiálu, který je rovněž hliníkový. Základní ocelový materiál se netaví a je smáčen roztaveným hliníkem. Jedná se tedy o tzv. „svarové pájení“.

CMT metoda má různé modifikace např. CMT Pulse, kde se kombinuje CMT cyklus s pulzním cyklem, což umožňuje zvětšení šíře výkonů. Další modifikací je CMT Advanced, kdy ve fázi zkratu probíhá změna polarity, čímž se dosahuje vyššího odtavného výkonu, maximálního přemostění svarové spáry nebo řízeného tepelného zatížení.

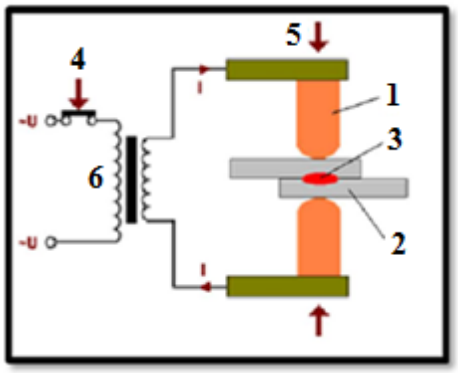
2.2.3 Odporové svařování [17], [25], [26], [27]

Svařování elektrickým odporem je využíváno pro spojení dvou k sobě přiložených materiálů, bez použití přídavného materiálu. Oba materiály jsou k sobě přitisknuty elektrodami, kterými prochází elektrický proud. Jelikož svařovaný materiál (např. ocel) má oproti měděným elektrodám nižší elektrickou vodivost, klade elektrickému proudu vyšší odpor. Začne se tedy ohřívat, až se stane tvárným nebo se roztaví. Elektrody k sobě přitlačí spojovaný materiál a vytvoří tak svarový spoj.

Výhodou této metody je vysoká rychlost svařování, možnost mechanizace a automatizace, tudíž vhodnost pro malosériovou i velkosériovou výrobu, možnost aplikace na většinu kovových materiálů.

Odporové svařování pro spojování karoserií lze rozdělit na tři základní druhy:

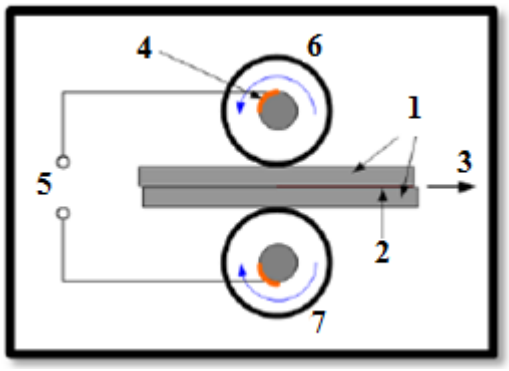
a) Bodové, viz obr. 13, – vhodné pro spojování plechů. Plechy se přeplátují a vloží mezi dvě tyčové elektrody. Zapne se elektrický proud a díly se svaří. Proud se vypne, sevření elektrodami však trvá a svar tuhne pod tlakem, aby se vytvořila jemnozrnná struktura. Tato metoda nachází velké uplatnění při svařování karoserií automobilů, jelikož její robotizace je snadná. Při výrobě velkoplošných dílů také umožňuje v určité míře kompenzaci některých nepřesností.



1. Měděná elektroda
2. Svařovaný materiál
3. Bodový svar
4. Spínač
5. Přítlačná síla
6. Svařovací trasformátor

Obr. 13 Schéma bodového svařování [27]

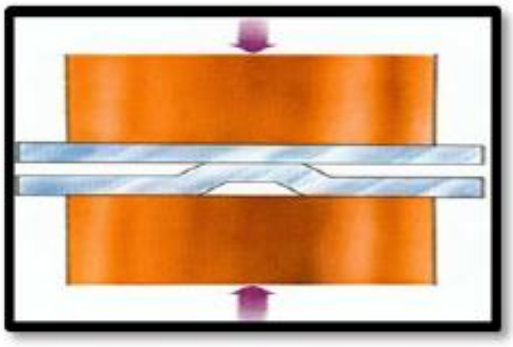
b) Švové, viz obr. 14 – vhodné pro průběžné svařování plechů, trubek, profilů. Kotoučové elektrody se otáčí, stlačují materiál a přivádí do nich elektrický proud. Elektrický proud je přiváděn přerušovaně, buď s velmi malými impulsy (souvislé těsné svary) nebo delšími impulsy (řada bodových svarů).



1. Svařovaný materiál
2. Svar
3. Směr svařování
4. Elektrický kontakt
5. Zdroj stejnosměrného napětí
6. Kotoučová elektroda

Obr. 14 Schéma švového svařování [27]

c) Výstupkové, viz obr. 15, – na svařovaném díle se nejprve vylisují výstupky vhodného tvaru. Elektrody jsou v tomto případě deskové a přitlačují oba materiály k sobě. Po zapnutí svařovacího proudu prochází těmito výstupky největší proud, materiál se nataví a vytvoří se svar.



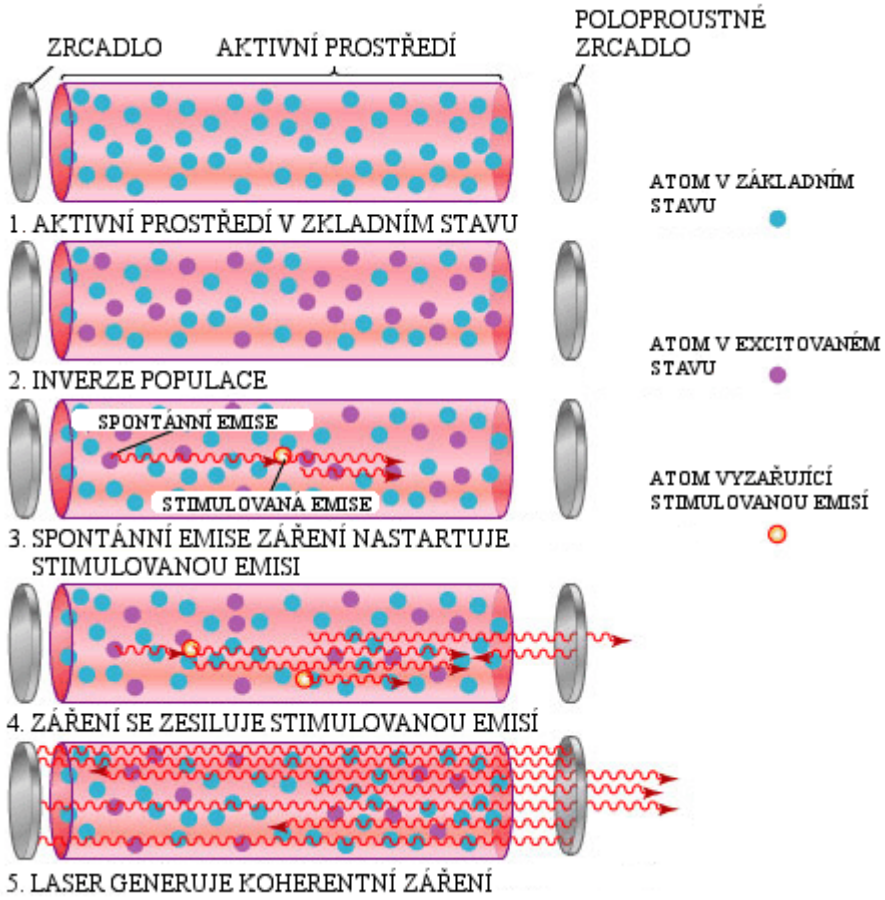
Obr. 15 Schéma výstupkového svařování [27]

2.2.4 Laser [28], [29], [30], [31], [32]

Laser je zkratka anglického názvu „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“, což lze přeložit jako „Zesílení světla stimulovanou emisí záření“. Laser tedy zesiluje elektromagnetické záření vzniklé stimulací emise fotonů.

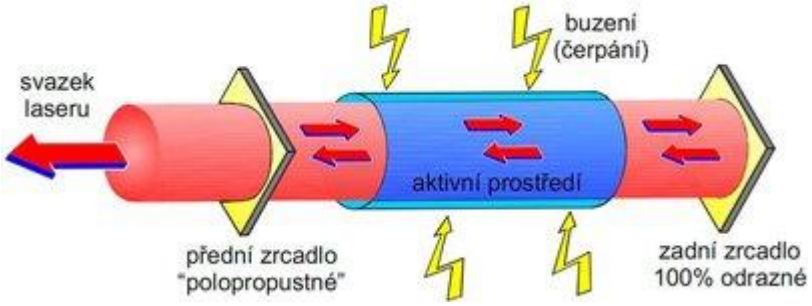
Základním prvkem laseru je aktivní prostředí, v kterém dochází k buzení (opticky, elektricky, chemicky apod.) základního elementu, např. atomu.

Díky buzení (dodání energie) dojde k uvolnění fotonů. Ten se uvolní, když excitovaný atom kvantově přechází z vyššího energetického stavu do nižšího. Tento proces se nazývá stimulovaná emise. Při uvolňování fotonů dochází k lavinovému efektu, kdy foton dopadá na excitovaný atom a způsobuje jeho přechod z horní energetické hladiny na dolní a zároveň dochází k emisi dalšího fotonu, jak ukazuje obr. 16.



Obr. 16 Schéma vzniku laserového paprsku [29]

Optický rezonátor, viz obr. 17, který obklopuje aktivní prostředí polopropustným a nepropustným zrcadlem, způsobuje odraz pohybujících se uvolněných fotonů a jejich počet tak rapidně roste. Uvolněná energie pak ve formě proudu fotonů (svazku laseru) vychází přes polopropustné zrcadlo ven.

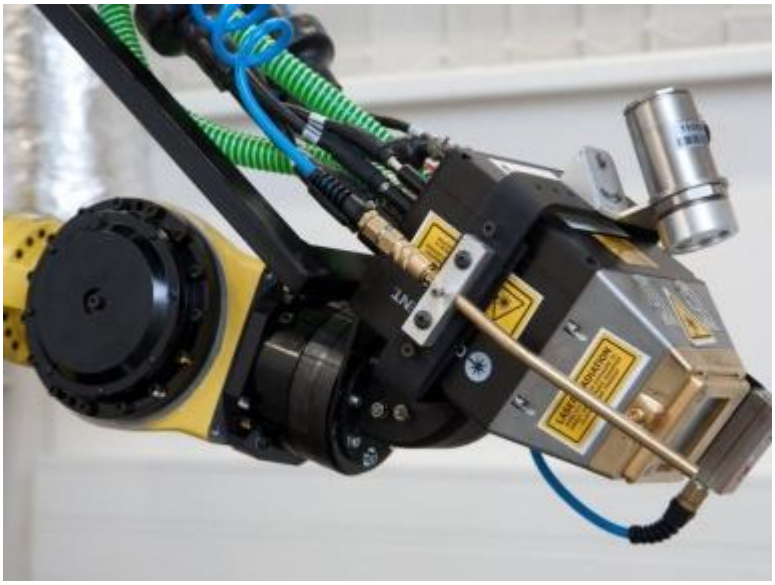


Obr. 17 Obecné schéma laseru [29]

Laserové záření se vyznačuje koherentností (uspořádaností) a monochromatičností (jednobarevností) paprsku, jehož divergence (rozbíhavost) je velmi malá.

Pomocí optické soustavy lze paprsek laseru soustředit na velmi malé místo a tím tak dosáhnout vysoké plošné hustoty energie. V praxi se toho využívá např. pro řezání, svařování, značení, kalení apod.

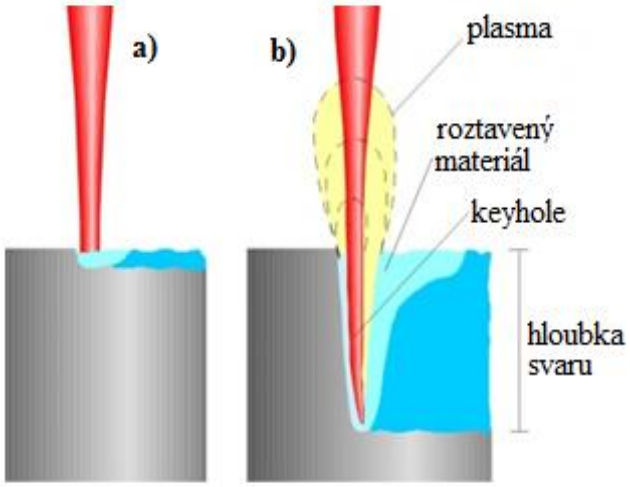
Lasery se nejčastěji dělí podle typu aktivního prostředí na plynové, pevnolátkové, a vláknové lasery. U **plynových laserů** je aktivním prostředím plyn, který je možné budit např. elektricky, opticky, radio-frekvenčními vlnami apod. Obvykle se používá HeNe (helium-neonový) nebo CO_2 laser, který se často používá pro řezání. U **pevnolátkových laserů** je aktivním prostředím pevná látka, nejběžněji monokrystal. Buzení je pak nejčastěji optické a to pomocí laserových diod nebo výbojkami. Jako aktivní prostředí se v průmyslu často používá monokrystal Nd:YAG (ytrium aluminium granát dopovaný atomy neodymu) a používá se především pro laserové svařování, řezání a značení. Zvláštním typem pevnolátkových laserů jsou **vláknové lasery**, viz obr. 18, kde je aktivní prostředí tvořeno optickým vláknem dopovaným např. atomy erbia nebo yterbia. Aktivní prostředí je buzeno laserovými diodami, jejichž záření je do aktivního vlákna přiváděno pomocí optického vlákna. Laser tedy neobsahuje žádné opto-mechanické prvky, např. zrcadla. Jedná se o nejmodernější technologii, která nachází uplatnění při svařování, řezání nebo značení. Dalším typem laserů jsou **diodové (polovodičové) lasery**. Jejich aktivní prostředí tvoří elektricky čerpaná polovodičová dioda. Jejich výhodou je vysoká účinnost, nevýhodou je však nízká kvalita výstupního svazku. Své použití nachází především pro svařování nebo kalení. Pro svařování kovových materiálů jsou nejvhodnější pevnolátkové nebo diodové lasery s vlnovou délkou v oblasti cca 800 - 1070 nm s vysokou plošnou hustotou energie.



Obr. 18 Vláknový laser YLR-20000 s výkonem 20 kW [30]

Při svařování laserem se v místě svaru transformuje světelná energie na tepelnou. Laserový paprsek s vysokou energií dopadá na povrch základního materiálu, kde se část jeho energie odrazí a část pohltí materiál. Pohlcená energie zapříčiní jeho intenzivní ohřev. Svařované materiály se tak nataví a spojí.

Výhodou svařování pomocí laseru je jeho vysoká produktivita, dobrá kvalita svaru i povrchový vzhled, velká hloubka průvaru, malá tepelně ovlivněná oblast, není potřeba přídavný materiál, možnost automatizace, možnost svařovat kovy i plasty. Jeho nevýhodou je vysoká cena zařízení a náročná příprava svařovaných dílů.



Laserové svařování je možno rozdělit na tzv. kondukční a penetrační režim, viz obr. 19. U kondukčního režimu svařování se absorbované teplo v materiálu přenáší vedením. Tento způsob umožňuje svařování jen do poměrně malých hloubek, rychlost svařování může být však vyšší. Toho lze využít při aplikacích, kdy je důležitější rychlost svařování, přičemž hloubka průvaru je dostačující. Povrchové svary jsou široké a ploché a pro jejich tvorbu postačují menší výkony laserů.

Obr. 19 a) kondukční, b) penetrační režim svařování [30]

Vyšší výkony laserů jsou potřebné pro penetrační režim svařování, kde jsou svary úzké a hluboké. Nad povrchem svařovaného materiálu se díky vysoké plošné energii laseru část materiálu odpaří. Tyto páry vytvoří s laserovým paprskem plazma a dojde k hlubokému provařování. Paprsek laseru tvoří kapiláru (tzv. keyhole) o průměru cca 1,5 - 2 násobku průměru svého ohniska. Z kapiláry vystupují páry odpařeného kovu, které brání jejímu uzavření. Energie laserového paprsku se ve stěnách kapiláry vedením dostává do taveniny a do okolního tuhého materiálu. Takto může laserový paprsek pronikat hluboko pod povrch materiálu a může tak vznikat úzký a hluboký svar.

Vnášení energie do materiálu lze pozitivně ovlivnit použitím ochranného plynu, který zvyšuje absorpci energie laserového paprsku. Ta může po vzniku plazmatu téměř celá vniknout do materiálu. Zvýší se tak účinek hloubkového provaření. Ochranný plyn lze však využít i pro ochranu chladnoucí taveniny před oxidací. Jako ochranné plyny se nejčastěji používají Ar, N_2, CO_2, He a jiné.

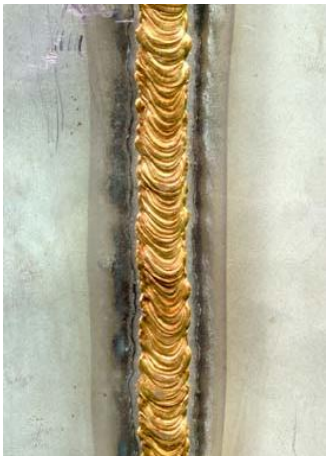
2.3 Pájené spoje [17], [33], [34]

Pájení je způsob spojení dvou materiálů pomocí přídavného materiálu – pájky. Pájka bývá nejčastěji ve formě drátu či pasty. Jelikož má pájka nižší teplotu tavení než spojovaný materiál, roztaví se. V důsledku rozpustnosti a difúzi atomů základního materiálu a pájky a díky adhezním a kohezním silám přilne pájka ke spojovaným materiálům a po ztuhnutí spojí oba materiály. Podle teploty tavení pájky se pájení dělí na tzv. měkké (teplota solidu pájky do 450°C) a tvrdé (teplota solidu pájky nad 450°C).

Vhodná pájka musí mít dobrou smáčivost, roztékavost, vzlínavost a nižší teplotu tání než spojovaný materiál. Nesmí obsahovat prvky, které by se základním materiálem vytvářely křehké intermediální fáze, a prvky s vysokým rozdílem elektrochemického potenciálu, aby nedocházelo ke korozi.

Při pájení se používá tavidlo, které rozpouští oxidy na povrchu spojovaných dílů a zamezuje jejich dalšímu vzniku. Snižuje povrchové napětí pájky a usnadňuje tak její smáčivost.

Výhodou pájení je možnost spojit díly, které jsou nesvařitelné nebo jen těžce svařitelné či pro svařování nevhodné. Lze tedy spojovat různé kombinace materiálů, např. hliník



Obr. 20 Pájený přeplátovaný spoj na pozinkovaném plechu [34]

s hliníkem či hliník s ocelí, nebo materiály se speciální povrchovou úpravou např. pozinkované díly. Oproti svařování vzniká při pájení v materiálu menší vnitřní pnutí a dochází v něm k menším strukturním změnám. Pájený spoj však vykazuje oproti svarovému spoji menší pevnost.

V automobilovém průmyslu se ke spojování karoserií pájením nejčastěji používá MIG, laserové nebo CMT pájení. Stále více se používá pájení na tvrdo, kde je pevnost mnohem vyšší než u pájení naměkko. S výhodou lze pájet pozinkované plechy, viz obr. 20, kde díky nižším pracovním teplotám, než u svařování, dochází v místě spoje k zachování jejich korozní odolnosti.

2.3.1 MIG pájení [35]

V automobilovém průmyslu jsou stále více používány pozinkované plechy, jejichž svařování je problematické z důvodu ztráty jejich korozní odolnosti. Vhodnějším způsobem spojování je tedy MIG pájení, které zachovává odolnost pozinkovaných plechů vůči korozi při vyhovující pevnosti spoje. Oproti klasickému MIG/MAG svařování dochází při MIG pájení pouze k roztavení přídavného materiálu, který spojí nenatavený základní materiál. Teplota oblouku se pohybuje kolem 1060°C, kdežto při běžném MIG/MAG svařování okolo 1650°C. Minimalizuje se tak vnesené teplo do spojovaných dílů a snižuje se poškození vrstvy zinku. Jelikož je teplota odpařování zinku (cca 910°C) nižší než teplota tavení přídavného drátu, dochází vždycky při MIG pájení k odpařování zinku. Dodrží-li se minimální teplota oblouku, zinek se pomocí katodických sil udrží v dostatečném množství v přechodové oblasti mezi základním materiálem a housenkou.

Pro MIG pájení se dnes většinou používá bronzového přídavného drátu, který při optimálních svařovacích parametrech, správném vedení hořáku a vhodné ochranné atmosféře dává vynikající výsledky, jako např. minimální tepelné ovlivnění základního materiálu, velmi malé odpařování zinku, katodová ochrana základního materiálu v okolí svaru, malý rozstřik a téměř zanedbatelný požadavek na dokončovací operace.

2.3.2 Laserové pájení [36]

Je založeno na tavení přídavné pájky pomocí soustředěného laserového paprsku. Materiálem pájky může být např. mosaz nebo slitiny cínu. Přednosti laserového pájení je bezkontaktní pracovní proces, možnost regulace předávané energie, přesné a úzké soustředění paprsku bez negativního tepelného zatížení okolního materiálu. Vysoké spolehlivosti laserového pájení lze dosáhnout řízením intenzity laserového paprsku v průběhu pájení a průběžnou kontrolou teploty povrchu spojovaných dílů.

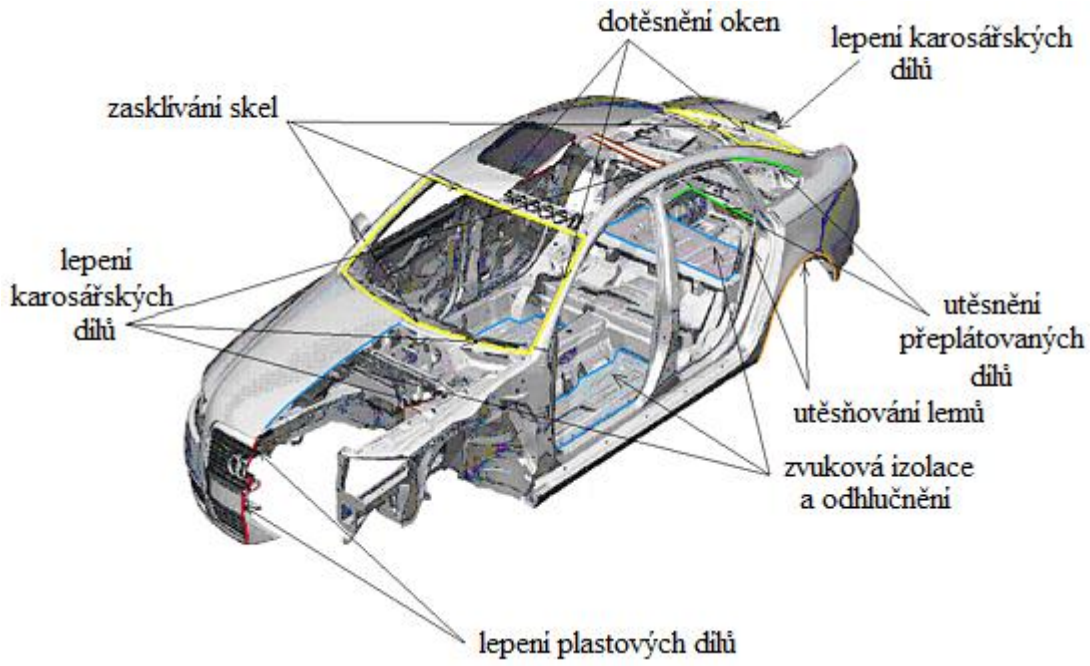
Nejdříve se pro pájení používaly pevnolátkové Nd:YAG lasery, které pracovali na vlnové délce 1064 nm a zaručovali příznivou absorpci v materiálu pájky. Dnes jsou však žádanější výkonové diodové lasery, které fungují na vlnové délce 780 - 980 nm. Oproti kruhovému profilu paprsku ostatních laserů mají spíše pravoúhlý průřez s téměř stálým rozdělením energie paprsku. Při správném zamíření paprsku lze pájená místa před nanesením pájky předehřívat a posléze i udržet déle natavenou pájku v tekutém stavu.

Pájená místa se takto lépe pokryjí a zvýší se tak kvalita spoje. Výhodou tohoto procesu je i jeho vyšší rychlost.

Nejčastější formou švů u pájených částí karoserií bývá koutový profil u přeplátovaných částí nebo lemový šev. V automatizované výrobě je důležité, že tyto spoje dovolují u spojovaných částí větší rozměrové tolerance, přičemž je vzájemná poloha dodržena. Pájený spoj se nemusí nijak ošetřovat a celý díl může pokračovat k další operaci, např. k lakování.

2.4 Lepené spoje [13], [37]

Pro spoje moderních karoserií se kromě běžných metod spojování používají i lepidla. Lepené spoje se používají hlavně v místech, kde není možné provést pájený, svarový či jiný spoj nebo je potřebné zvýšit těsnost a tuhost karoserie. Aplikace lepidel vede ke snížení hmotnosti a počtu spojovaných součástí, ale i ke zkrácení montážních časů. Lepidla mohou být pevnostní nebo vysoko-pevnostní a aplikují se samostatně nebo se přidávají k jiným typům spojů z důvodu zvýšení pevnosti v rizikových částech karoserie. Další lepidla plní těsnící a tlumící funkci a uplatňují se na odhlučnění karoserie nebo ke snížení rizika vzniku koroze v místě spoje. Obr. 21 ukazuje možné aplikace lepidel ve stavbě karoserie.



Obr. 21 Příklady lepených spojů ve stavbě karoserie [37]

2.4.1 Princip lepení [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44]

Spojované plochy karoserie nejsou nikdy tak ideálně rovné, aby k sobě dokonale přilnuly a drželi u sebe jen pomocí atomových sil. V případě spojení pevné a kapalné látky (lepidla) je však přilnutí mnohem uspokojivější. Kapalina je schopna vyplnit nerovnosti povrchu pevné látky a dokáže vytlačit z mikropórů lepeného materiálu většinu usazených plynů. Aby se zajistilo ideálního přilnutí k lepeným povrchům, je tedy zapotřebí, aby bylo

lepidlo v momentě lepení kapalné. Posléze se lepidlo vytvrzuje a mění se z kapalného do pevného skupenství.

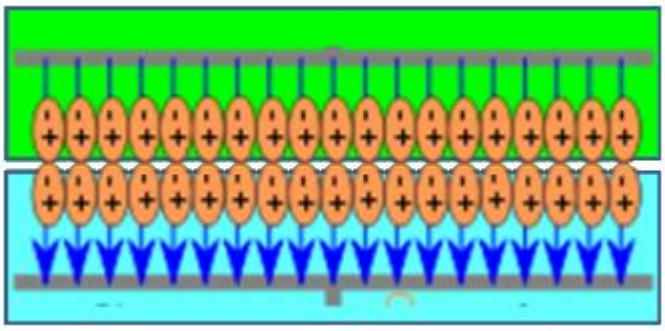
Pevnost lepeného spoje ovlivňují čtyři faktory:

- adheze = přilnavost lepidla k povrchu
- koheze = vnitřní soudržnost částic lepidla mezi sebou
- smáčivost lepeného povrchu lepidlem
- pevnost po vytvrzení

Adheze je schopnost lepidla přilnout a držet na lepeném povrchu, viz obr. 24. Aby došlo ke slepení, je vždy nutná dobrá adheze lepidla. Pokud lepidlo nemá dostačující adhezi, lepidlo a povrch materiálu k sobě nepřilnou, nedojde tedy ke slepení. V tomto případě jsou adhezní síly menší než síly kohezní, viz obr. 25. Podle způsobu vytvoření vazby mezi lepidlem a lepeným povrchem se rozlišuje pět teorií vytvoření adheze, molekulová, elektrostatická, mechanická, difúzní a chemická.

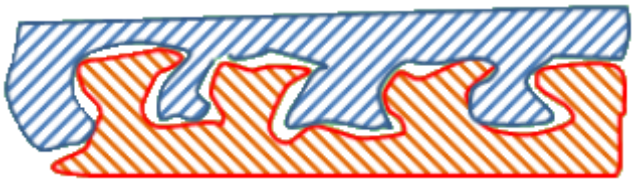
Molekulová teorie (adsorpční) je založena na vzájemném působení molekul adherendu a adheziva (lepidla). Je tedy zapotřebí, aby oba druhy molekul disponovaly funkčními polárními skupinami schopné vzájemného působení. Adhezní spoj pak vzniká ve dvou krocích. V prvním kroku dochází k transportu molekul lepidla k povrchu adherendu. Ve druhém kroku dochází, po přiblížení molekul lepidla (na vzdálenost menší než 0,5 nm), ke vzájemnému působení mezimolekulárních sil (van der Waalsových). Při vysoké četnosti výskytu těchto sil a při podmínce dostatečného kontaktu adherendu a adheziva na molekulární úrovni jsou van der Waalsovy síly pro pevné adhezní spojení dostačující. Příčinou malé pevnosti může být nedokonalý kontakt adherendu s lepidlem, který souvisí s dokonalostí smáčení povrchu adherendu lepidlem.

Elektrostatická teorie vychází z představy dvojité vrstvy, která je vytvořena dotykem dvou odlišných látek a je základem pro vznik adheze. Spoj se stává kondenzátorem, kde se k sobě přitahují dvě rozdílně nabité desky, viz obr. 22. Když se oddělí, vznikne potenciálový rozdíl, který se vybije nebo se vyzáří ve formě elektronové emise.



Obr. 22 Elektrostatické pole [42]

Mechanická teorie je založena na mechanické vazbě a vyskytuje se především u porézních a členitých povrchů. Lepidlo vyplňuje póry a štěrbiny a po jeho vytvrzení utvoří mechanicky prolnutý systém velkého počtu miniaturních pevných zámků, viz obr. 23. Tato vazba je významná při lepení materiálů, jako jsou papír, dřevo, keramika, pryž a jiné. Naopak je zanedbatelná při lepení hladkých ploch, např. skla.

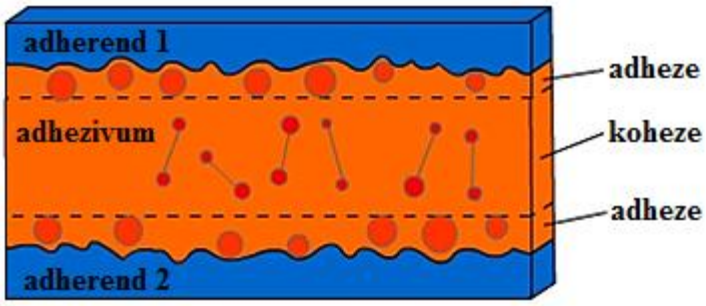


Obr. 23 Mechanický spoj [42]

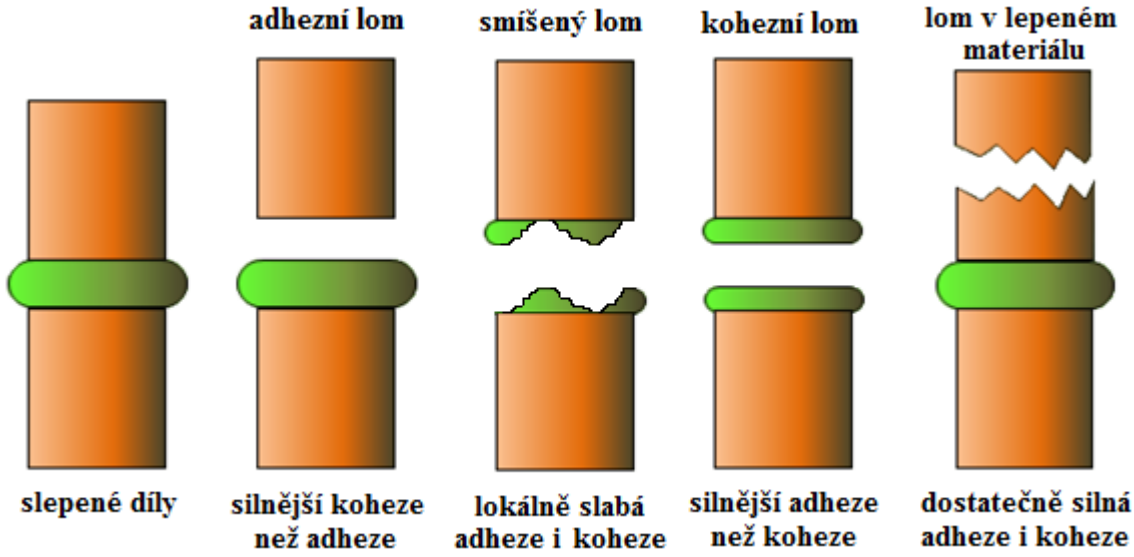
Difúzní teorie předpokládá, že pevnost spoje vzniká napříč rozhraním díky vzájemné difúzi polymerů či jiných materiálů. Pevnost spoje je pak ovlivněna průběhem difúze. Průběh difúze závisí především na čase, viskozitě, teplotě, relativní molekulové hmotnosti polymerů, na kompatibilitě adherendu a adheziva apod. Tato teorie však neobjasňuje spojování materiálů (např. kov-sklo), které vzájemně nedifundují, ale zdárně se lepí.

Chemická teorie uvádí, že k získání pevného spoje je nutné, aby spojované materiály spolu reagovaly napříč rozhraním a vytvořily primární chemické (kovalení) vazby. Předpokládá se, že lom tohoto spoje nebude adhezní, ale kohezní. Vhodné k lepení jsou tedy materiály, které lehce reagují s lepidlem. Pokud však mají špatné reakční vlastnosti, musí se povrch chemicky upravit tak, aby chemická reakce mezi povrchem a lepidlem mohla bez problémů proběhnout. Lepidla s vysokou chemickou reaktivitou jsou lepidla skupin např. hydroxy-, epoxy-, karboxy- (kyseliny), isokyanáto-, aj. Vhodné k lepení jsou pak povrchy s volnými chemickými skupinami hydroxy-, oxy-, karbonyl-, amino-, karboxymethyl-, oxidované povrchy kovů či plastů, přírodní materiály (celulóza, dřevo, papír), aj.

Koheze je schopnost částic lepidla držet pohromadě. Bude-li mít lepidlo malou schopnost koheze, lepidlo se přilepí k povrchu, avšak lepené povrchy neudrží spolu slepené. V tomto případě jsou kohezní síly menší než síly adhezní, viz obr. 25.

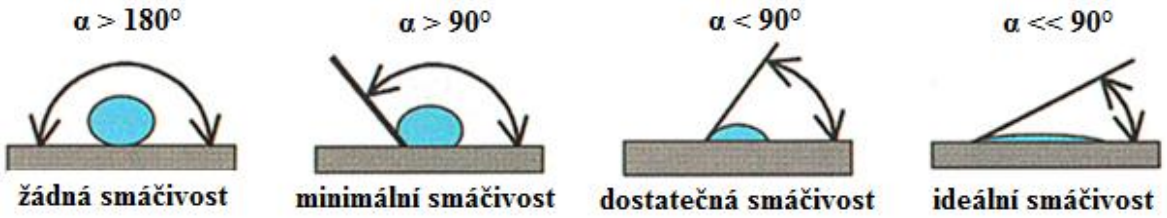


Obr. 24 Adheze a koheze v lepeném spoji [37]



Obr. 25 Typy porušení lepeného spoje [42]

Smáčivost lepeného povrchu hraje významnou roli při lepení, viz obr. 26. Žádoucí jsou povrchy smáčivé, protože lepidlo lépe vnikne do mikrostruktury a pórů lepeného materiálu.



Obr. 26 Závislost úhlu smáčivosti na smáčení lepeného materiálu lepidlem [37]

Pevnost lepeného spoje je zprvu nízká, zvyšuje se však vytvrzováním. Některá lepidla se vytvrzují při pokojové teplotě, jiná za zvýšené teploty cca 120°C, jiná však za vysokých teplot cca 200°C. Většinou se vytvrzování lepidel na karoserii provádí při vypalování kataforetického lakování.

Výhody technologie lepení:

- možnost spojovat stejné, ale i různorodé materiály
- nepoškodí se celistvost spojovaných dílů
- žádné tepelné ovlivnění spojovaného materiálu
- vodotěsnost a plynotěsnost spojů
- tlumení vibrací a zvýšení tuhosti lepené sestavy
- rychlá aplikace
- snižuje riziko vzniku koroze v místě spojení
- možnost jednoduché aplikace barev či laků přímo na lepený spoj
- vysoká pevnost spojů
- přenos zatížení

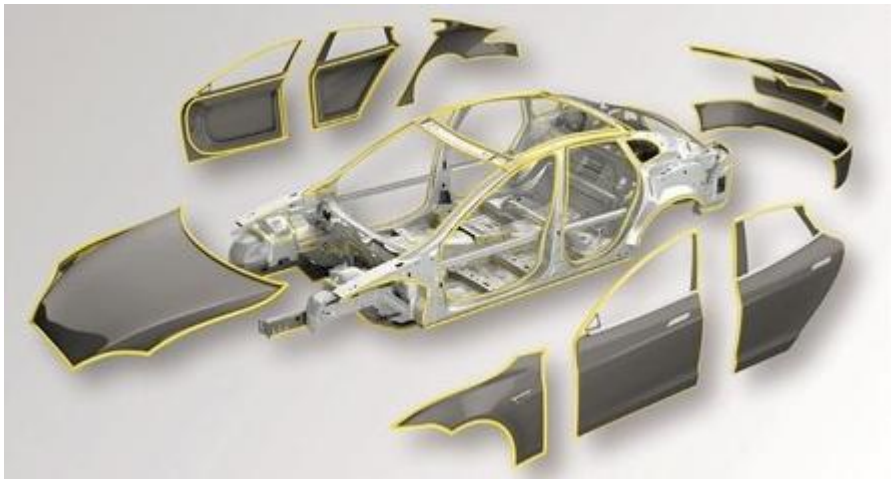
Nevýhody technologie lepení:

- nutná velmi dobrá vzájemná rovinnost spojovaných ploch
- nutnost vysoké čistoty lepených dílů
- povrchy se špatnými adhezními vlastnostmi je třeba speciálně upravit
- nerozebíratelnost spojů
- nízká odolnost vůči vysokým teplotám
- nízká počáteční pevnost, výsledné pevnosti je dosaženo až po vytvrzení
- náchylnost k plastickému tečení při dlouhodobém statickém zatížení

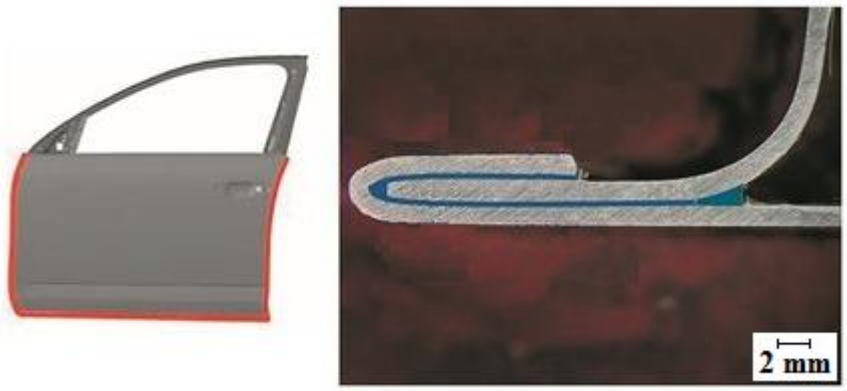
2.4.2 Rozdělení lepidel [12], [38], [45], [46], [47]

V konstrukci karoserie se hojně aplikují **kaučuková lepidla**, která se využívají pro spojení a utěsnění plechů výztuhami, např. pro spojení vnitřních výztuh střechy nebo kapoty. Využívá se tady antivibračních a tlumicích vlastností této kategorie lepidel. Aplikují se také na místech s vyšší možností vzniku koroze, např. v místě řezové hrany plechů apod.

Další druh lepidel je založen na bázi **epoxidových pryskyřic**. Vyrábí se jako jednosložková, dvousložková či vícesložková. Používají se zejména dvousložková lepidla, která jsou vhodná pro konstrukční spoje. Teplotní odolnost těchto lepidel je -50°C až +100°C a jejich běžná pevnost je 13 - 15 MPa. Mohou dosahovat i pevnosti vyšší než 20 MPa, pak se označují jako vysoko-pevnostní lepidla. Tyto lepidla se tedy vyznačují vysokou pevností a zvyšují tak celkovou tuhost karoserie. Vynikají také dobrou přilnavostí a možností aplikace i na mastné povrchy. K typickému použití patří střešní profily, lemový spoj panelových dílů, dveří, kapoty či pátých dveří, nebo místa v podlahové části karoserie, viz. obr. 27, 28.



Obr. 27 Aplikace epoxidových pryskyřic v konstrukci karoserie [45]



Obr. 28 Příklad konstrukčního řešení lepeného spoje v lemu bočních dveří [45]

Kyanoakrylátová lepidla se používají pro lepení malých slícovaných povrchů. **Akrylátová anaerobní** lepidla slouží k těsnění, ke stabilizaci rozebíratelných dílců nebo pro zajištění šroubových spojů proti vibraci či korozi. Mezi nejmodernější lepidla pro plošné a elastické lepení patří lepidla na bázi **MS-polymerů**. Jsou vhodná pro lepení kovů, ale i pro kombinované lepení kovů s plasty, sklem apod. Jsou využívána pro tmelení švů a spojů karoserie. MS-polymery se vyznačují vysokou pevností a elasticitou, chemickou a tepelnou stabilitou. K docílení dobré pružnosti a pevnosti spoje je nutné, aby nanesená vrstva lepidla byla dostatečně silná a vytvořila tak pružný polštář, který pohlcuje síly, viz obr. 29. Pružná lepidla je vhodné aplikovat např. v místech spojení dvou různých materiálů z důvodu jejich rozdílné tepelné roztažnosti.

Obr. 29 Aplikace pružného lepidla [12]

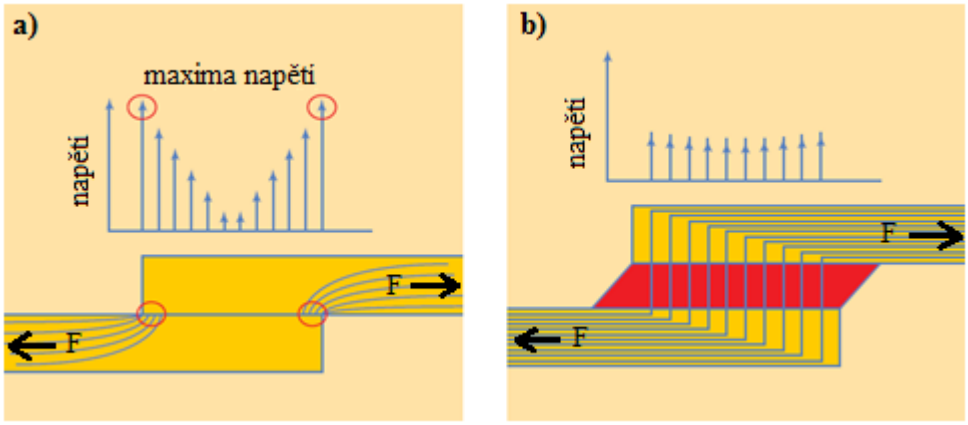
Lepidlo se na části karoserie nanáší tlakovými tryskami prostřednictvím robotu, viz obr. 30. Další robot spojí lepené díly. Manuální aplikace byla pro svou nespolehlivost vytlačena.

Obr. 30 Robotické nanášení lepidla pomocí tlakové trysky [45]

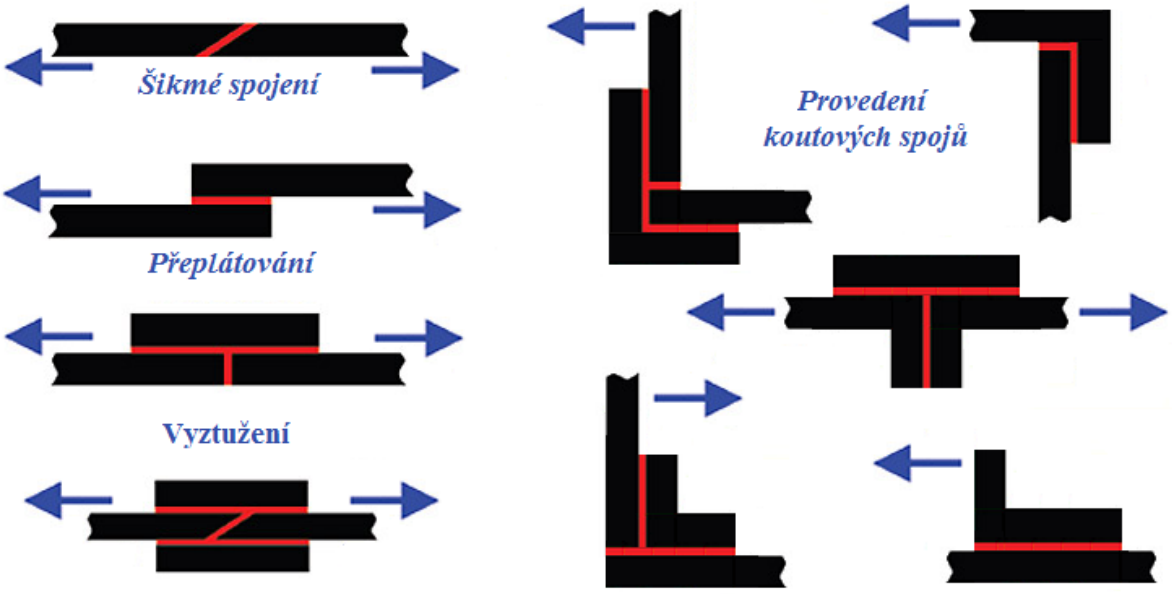
2.4.3 Konstrukce lepených spojů [46], [40], [48], [49]

Mezi předpoklady pro vytvoření kvalitního lepeného spoje patří mimo jiné i vhodná konstrukce spoje. Lepené spoje jsou typické velmi dobrou pevností ve smyku, kdežto pevnost v tahu nebo v odlupování je podstatně nižší. Zásady vhodné aplikace lepeného spoje vycházejí z typu použitého lepidla, ale i nutnosti co nejvíce snížit namáhání v tahu a odlupování. Jestliže nelze tyto faktory zredukovat a je-li nutné zvýšit spolehlivost spoje, přidávají se k lepení další metody spojování, např. bodové, laserové, MIG/MAG svařování, nýtování apod. Rozložení napětí ve smyku na jednoduše přeplátovaném spoji ukazuje obr. 31.

Na lepení nejsou vhodné díly s velikým a složitým zakřivením. Je tedy potřeba konstrukci rozdělit na co nejméně složité části. Nejčastěji se používají jednoduše přeplátované spoje, přičemž se vyšší pevnosti dosahuje u tenkých plechů. Spoje je nutné umístit tak, aby byly namáhány ve smyku, nikoliv na odlupování, viz obr. 32. Během lepení je nutné pečlivě dodržet předepsaný technologický postup a vyvarovat se dvojitému lepení, které je v průběhu montáže vystavené odlupujícím silám.



Obr. 31 Rozložení napětí ve spoji při použití a) tuhého b) pružného lepidla [49]



Obr. 32 Vhodné situování lepených spojů [46], [48]

2.4.4 Postup lepení [40]

Postup zhotovení lepeného spoje má čtyři základní fáze:

a) Příprava spojovaného materiálu na lepení – nejdůležitější je smáčivost adherendu s lepidlem. Účelem všech úprav lepených povrchů je maximálně zvýšit smáčivost povrchu s lepidlem. To se provádí fyzikálními metodami (tryskání, broušení, kartáčování apod.) nebo chemickými metodami (odmašťování, moření, fosfatizace apod.).

b) Příprava lepidla – závisí na druhu lepidla, např. u dvousložkových lepidel je třeba obě složky promíchat

c) Nanášení lepidla – je potřeba nanést lepidlo po celé lepené ploše a vytvořit souvislou rovnoměrnou vrstvu o určité tloušťce. Lepidlo se nanáší buď na obě lepené plochy, anebo pouze na jednu.

d) Montáž spoje – slepované komponenty se vhodnými přípravky zafixují pod stanoveným tlakem k sobě a zajistí se chemické a fyzikální podmínky pro tvorbu pevných vazeb, kdy dojde k vytvrzení lepidla a dosažení jeho maximální pevnosti.

Předpokladem pro vytvoření kvalitního lepeného spoje se všemi jeho příznivými vlastnostmi je především dodržení všech kroků technologického postupu, vhodná konstrukce spoje a vhodná kombinace použitého lepidla a lepeného materiálu.

3 NÁVRH A DOPORUČENÍ PRO ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTU

V konstrukci karoserie se vyskytuje mnoho metod hybridního spojování. V experimentální práci se však vzhledem k dostupnosti spojovacích technologií zaměřilo pouze na technologii lepení a její kombinaci s laserovým a MAG svařováním. Pro lepení se z důvodu lepšího vyhodnocení experimentu použije dvousložkové epoxidové lepidlo. Epoxidová lepidla nejsou moc pružná, jsou však velmi tvrdá. Bude tak dobře zřetelná lomová plocha spoje a bude se tak moci určit, zda došlo k adheznímu nebo koheznímu porušení spoje. Na trhacím stroji se provede tahová zkouška a získají se tak mechanické vlastnosti všech zkoušených typů spojů, které se pak následně porovnají. Bude se zkoumat i kvalita provedených spojů. Podle získaných výsledků se vyhodnotí, který spoj je vhodný pro spojování částí karoserie a který nikoliv. U všech vzorků se bude jednat o přeplátovaný spoj zatěžovaný ve smyku, protože je pro technologii lepení nejvhodnější.

Pro experiment hybridního spoje byly navrženy dva typy jeho provedení. U prvního provedení se vzorky po celé stykové ploše slepí a po vytvrzení lepidla svaří. Ve druhém provedení se vzorky slepí pouze na části stykové plochy, v okolí provedení svaru se lepidlo nanášet nebude. Následně se lepidlo vytvrdí a spoj se svaří. Zjistí se tak, jestli se lepidlo v důsledku svařování ovlivní či nikoliv. Některé MAG svary se provedou ihned po slepení vzorků, jiné se provedou až po vytvrzení lepidla. Zjistí se tak, jestli vnesené teplo při svařování ovlivňuje proces vytvrzování lepidla.

3.1 Volba materiálu [18], [50]

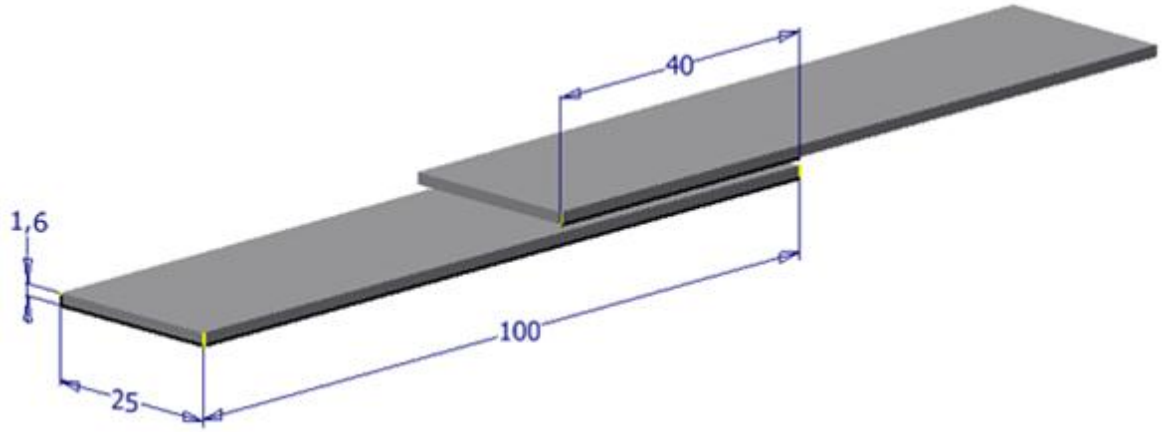
Zkušební vzorky budou z oceli EN 10027-1 DC01 (ČSN 11 321), která se používá pro výrobu různých částí karoserie. Jedná se o jemnozrnnou konstrukční ocel válcovanou za studena, která je vhodná pro tváření za studena, má dobrou svařitelnost a je vhodná pro povrchovou úpravu pozinkováním nebo lakováním. Z důvodu dobrých mechanických vlastností, chemického složení, viz tab. 4, a z hlediska svařitelnosti je ocel DC01 vyhovující pro výrobu karoserie.

Tab. 4 Mechanické a chemické vlastnosti oceli DC01 [50].

Pevnost na mezi kluzu	Pevnost při přetržení	Tažnost	Tvrdost	Chem. složení - hmotnostní podíl v % max.			
R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	HV	C	P	S	Mn
max. 280	270-420	min. 28	max. 115	0,12	0,045	0,045	0,6

4 ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTU

Dva vzorky vyrobené z materiálu DC01 o rozměrech 100x25x1,6 mm byly spojeny pomocí přeplátovaného spoje, přičemž délka přeplátování byla 40 mm, viz obr. 33. Byly vytvořeny různé provedení spoje, přičemž od každého typu spoje bylo zhotoveno několik vzorků, které se pak podrobily zkoumání. Na základě výsledků zkoušek a získaných informací bylo provedeno technické zhodnocení práce.

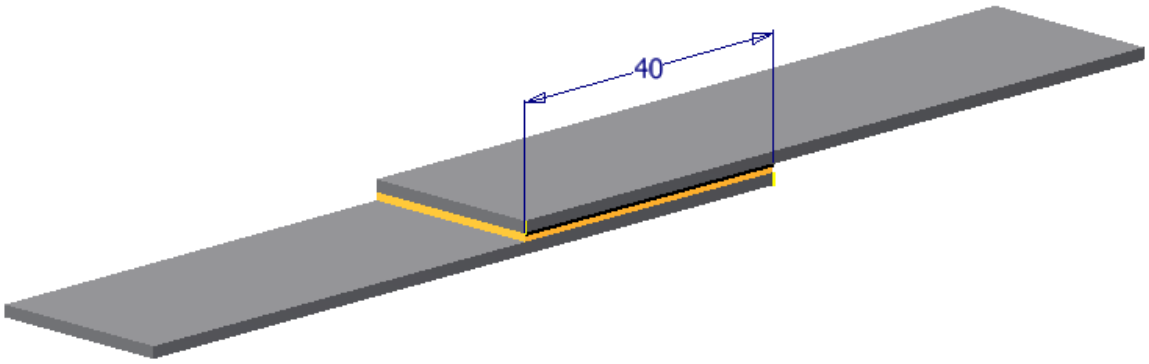


Obr. 33 Rozměry vzorků a velikost přeplátování v [mm]

4.1 Typy provedení spojů

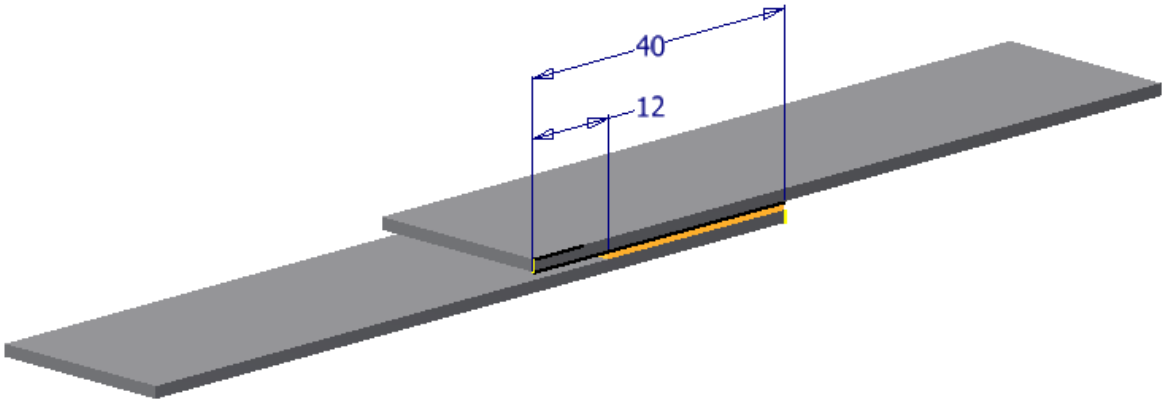
Pro porovnání a zhodnocení lepených hybridních spojů byly použity různé varianty provedení spoje, viz obr. 34-39. Rozměry jsou uvedeny v [mm].

a) Vzorek A – lepení po celé stykové ploše spoje



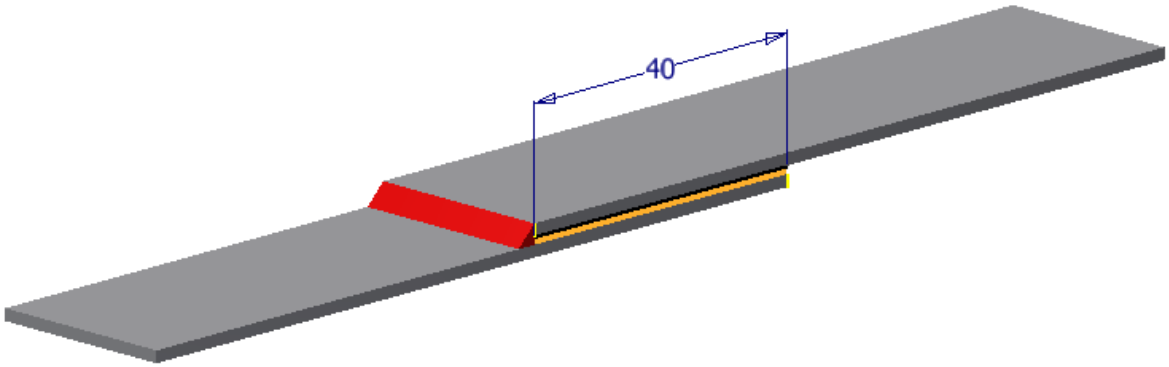
Obr. 34 Vzorek A

b) Vzorek B – lepení jen v části stykové plochy spoje



Obr. 35 Vzorek B

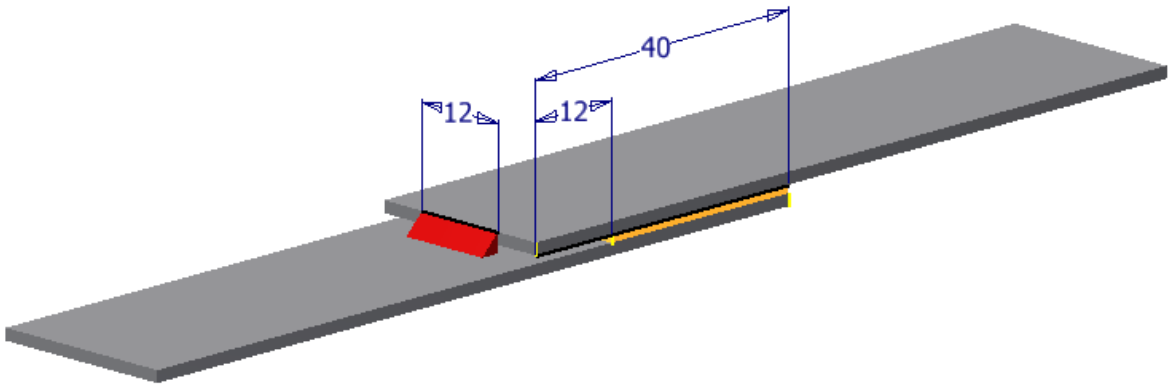
c) Vzorek C – lepení po celé stykové ploše spoje a MAG svařování až po vytvrzení lepidla



Obr. 36 Vzorek C

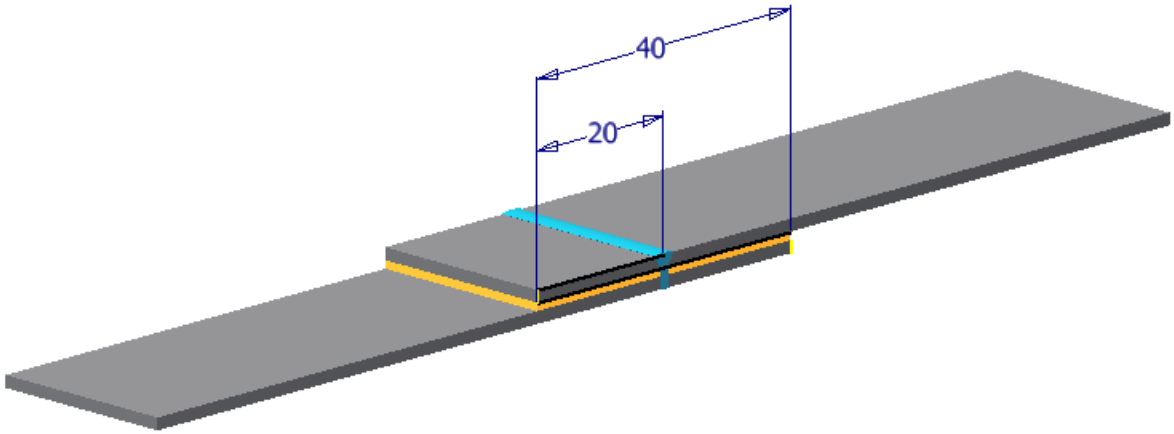
d) Vzorek D – lepení jen v části stykové plochy spoje a MAG svařování až po vytvrzení lepidla

e) Vzorek E – lepení jen v části stykové plochy spoje a MAG svařování před vytvrzením lepidla



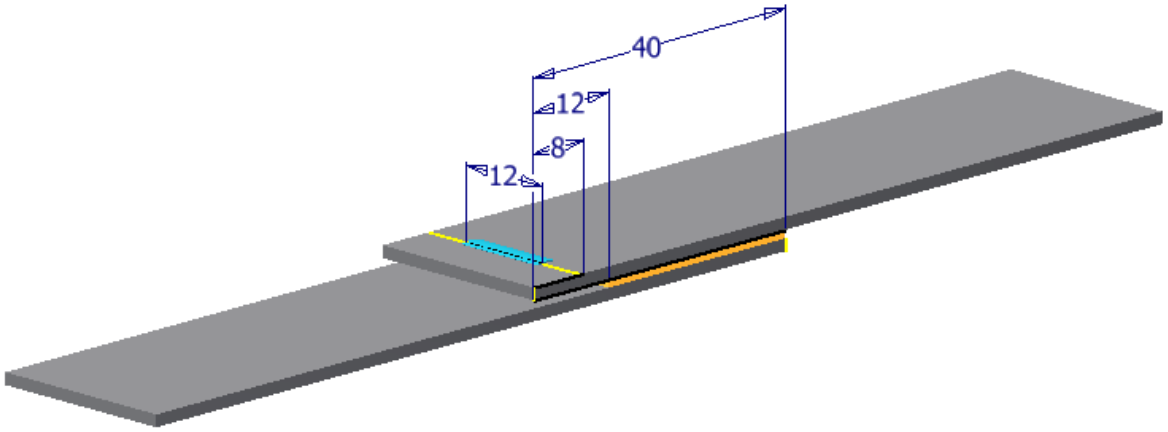
Obr. 37 Vzorek D, E

f) Vzorek F – lepení po celé stykové ploše spoje a laserové svařování až po vytvrzení lepidla



Obr. 38 Vzorek F

g) Vzorek G – lepení jen v části stykové plochy spoje a laserové svařování až po vytvrzení lepidla



Obr. 39 Vzorek G

4.2 Postup spojování vzorků [51], [52]

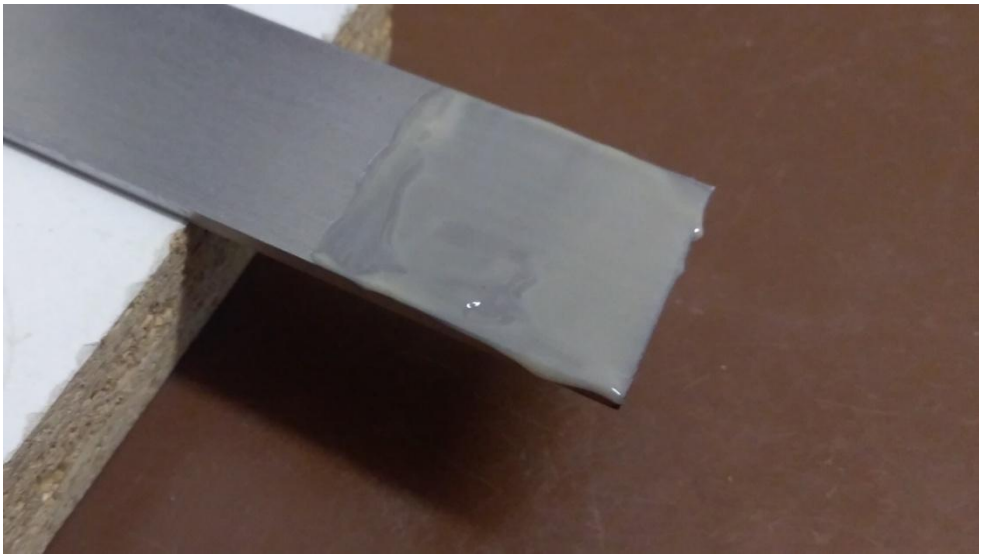
Všechny vzorky se nejdříve pomocí technického lihu odmastily. Část, na kterou se nanášelo lepidlo, se vybrousila smirkovým papírem, očistila a znovu odmastila isopranolem, který je velmi vhodný odmašťovač před lepením, viz obr. 40. Kdyby se vzorky neodmastily, byla by adheze lepidla k materiálu menší a výrazně by se tak snížila pevnost spoje.

Obr. 40 Dole - očištěný, vybroušený a odmaštěný vzorek, nahoře - neupravený vzorek

K lepení bylo použito epoxidové tixotropní lepidlo SPT Epoxy 0215, viz obr. 41. Jeho materiálový list je v příloze 1. Jedná se o pastovité dvousložkové lepidlo, jehož složky jsou při skladování v kartuši od sebe odděleny. Při aplikaci se obě složky nanesly na vedlejší podložku, na které se důkladně promíchaly. Pro zajištění požadovaných vlastností lepidla je nutné dodržet správný poměr obou složek v konečném lepidle. Složky se míchají v objemovém i hmotnostním poměru 1:1 a je nutno dodržet předepsaný poměr s přesností 1 %. Na vytlačení lepidla z tuby se tedy použilo speciální pistole, která tento správný poměr zaručí.

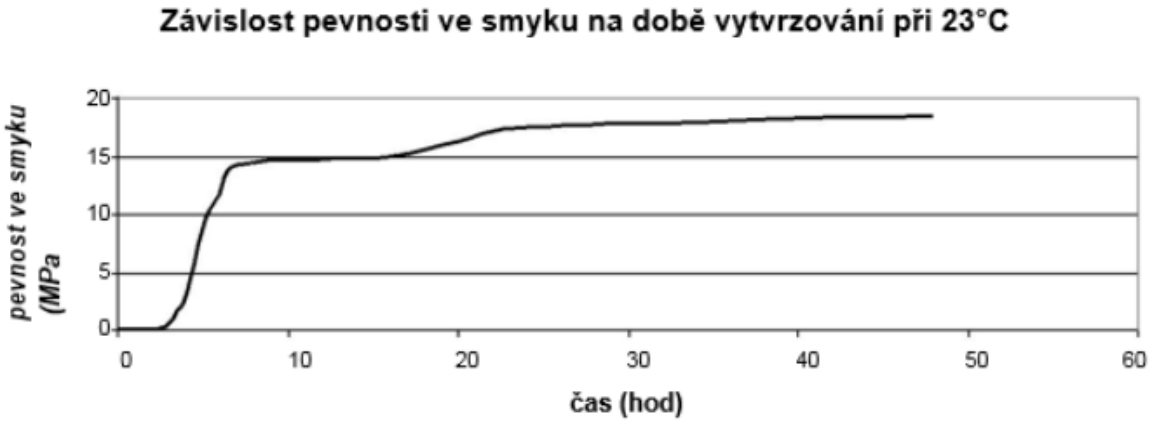
Obr. 41 Kartuše lepidla SPT Epoxy 0215 ve vytlačovací pistoli

Po promíchání bylo nutné lepidlo co nejrychleji nanést na vzorky, protože doba jeho zpracování je 30 - 40 minut při 25°C. Lepidlo se nanášelo špachtličkou v tenké vrstvě (optimálně 0,05 - 1 mm) na očištěnou část vzorku, viz obr. 42. Po aplikaci lepidla se na tuto část položil druhý vzorek, na který bylo nutné zatlačit, aby se ze spoje vytlačilo přebytečné množství lepidla. Poté se nechaly lepené spoje vytvrdit při pokojové teplotě.



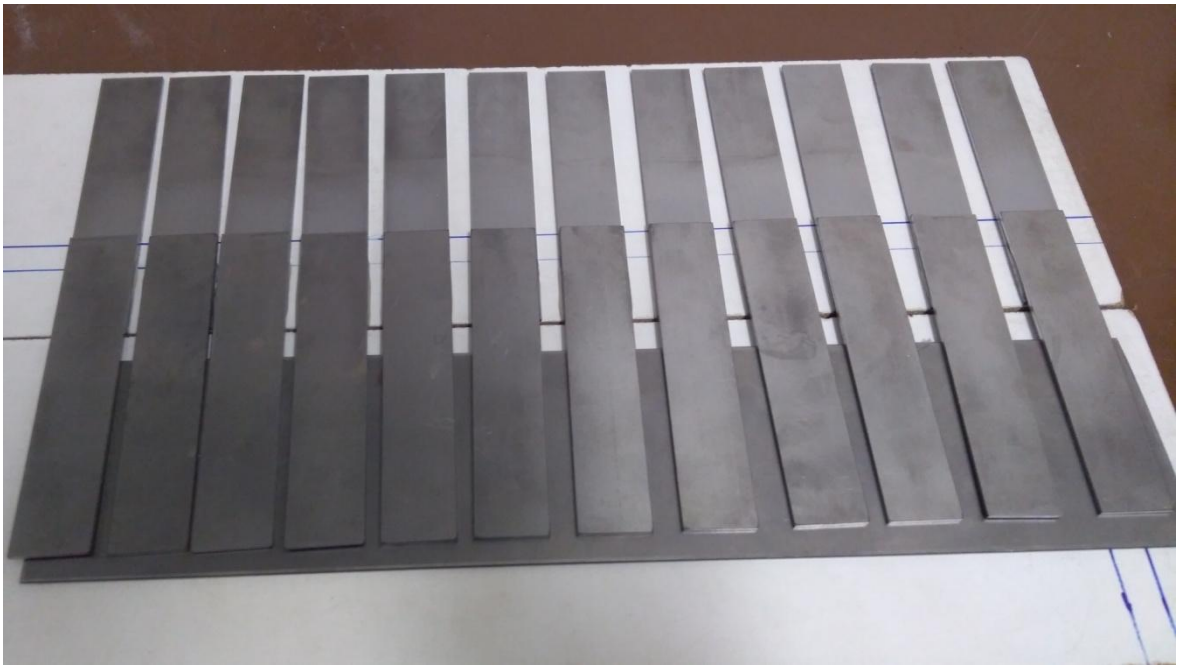
Obr. 42 Nanesení tenké vrstvy lepidla na vzorek

Lepidlo SPT Epoxy 0215 se vytvrzuje při pokojové teplotě, kdy začíná tuhnout po 60 - 90 minutách. Manipulační pevnosti dosahuje po 4 hodinách, maximální pevnosti však až po 48 hodinách, viz obr. 43. Vytvrzování je možné urychlit prostřednictvím zvýšené teploty, např. 60 minut při 80°C nebo 20 minut při 120°C.



Obr. 43 Vývin pevnosti ve smyku v čase při vytvrzování [51]

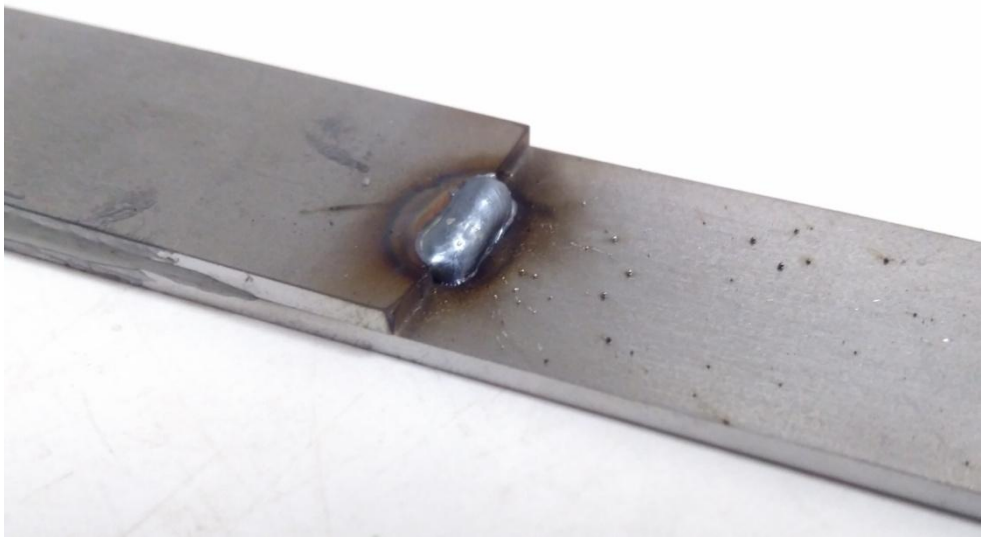
Všechny vzorky se postupně slepily, viz obr. 44, a následně byly ke vzorkům C – F přidávány svarové spoje.



Obr. 44 Slepené vzorky

Vzorky C, D a E se svařovaly metodou MAG, viz obr. 46. Bylo použito svařovacího inventoru TransSteel 2200 od firmy Fronius, viz obr. 45. Přídavným materiálem byl drát o průměru 1 mm s označením Weld G3Si1, který je vhodný pro svařování nelegovaných a nízko legovaných uhlík-manganových konstrukčních ocelí. Svařovací parametry byly nastaveny na 14V a 60A. Jako ochranný plyn byl použit plyn M21, což je směs argonu a oxidu uličitého (82% Ar, 18% CO_2).

Obr. 45 Svařovací zdroj TransSteel 2200 [52]



Obr. 46 Slepený a následně svařený vzorek E

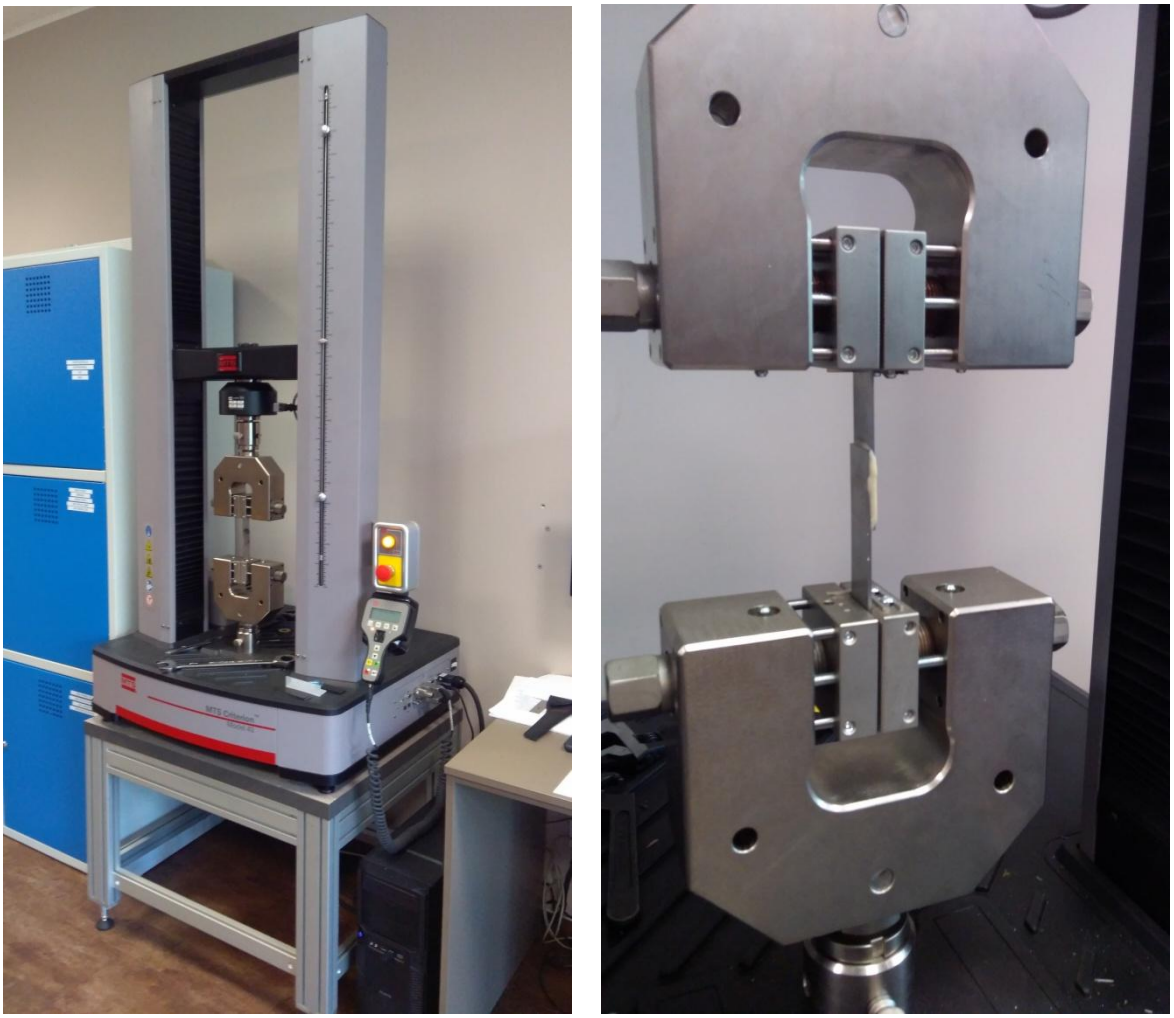
Vzorky F a G se svařovaly pomocí laseru, viz obr. 47. Pro svaření bylo použito optického vláknového laseru YLS 2000 od firmy IPG. Svařovací hlava je upevněna na robotickém rameni, které umožňuje velký rozsah polohy při svařování. Svařovací výkon byl nastaven na 1500 W a rychlost svařování na 20 $mm.s^{-1}$. Během svařování byl do místa přiváděn ochranný plyn argon.

Obr. 47 Slepený a následně svařený vzorek G

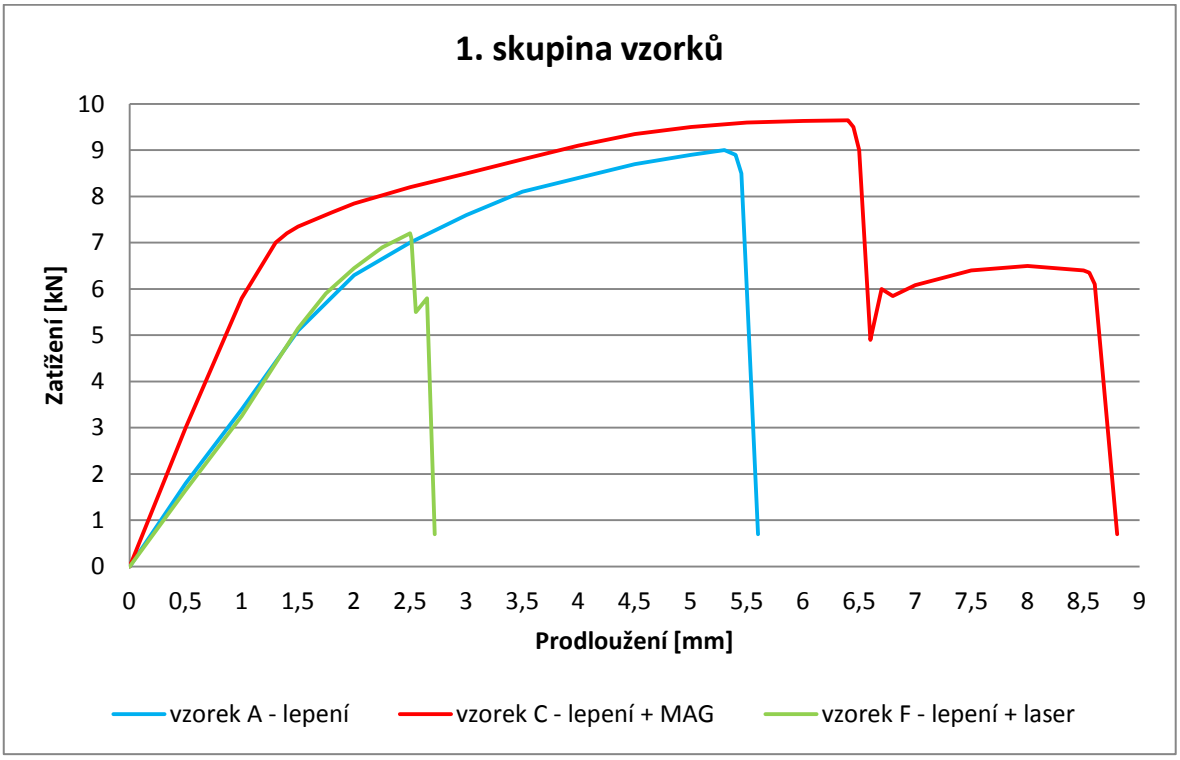
4.3 Trhací zkouška [53], [54]

Všechny vzorky byly podrobeny trhací zkoušce, při které se zjišťovala síla nutná k jejich přetržení. Spoje byly namáhány ve smyku, protože tak má lepidlo největší únosnost. Vzorky byly upevněny do trhacího zařízení MTS Criterion Model 43, viz obr. 48, a následně zatěžovány až do jejich porušení. Průběh trhací zkoušky ukazují

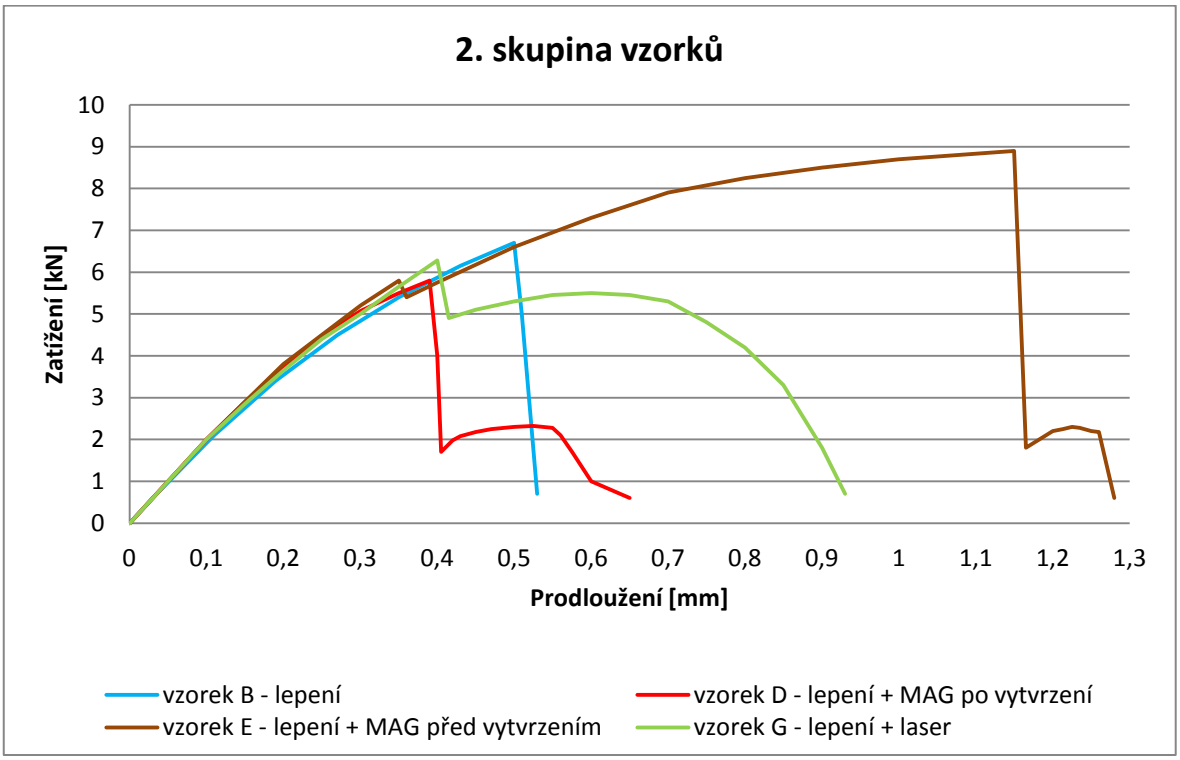
obr. 49 - 50, kde je zobrazena zatěžující síla v závislosti na prodloužení. V tab. 5 je uvedena maximální zatěžující síla nutná k přetržení vzorků. Podrobné technické informace trhacího zařízení jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 48 a) Trhací zařízení – vlevo b) vzorek upnutý do čelistí – vpravo



Obr. 49 Průběhy trhací zkoušky pro 1. skupinu vybraných vzorků – lepení po celé ploše spoje



Obr. 50 Průběhy trhací zkoušky pro 2. skupinu vybraných vzorků – lepení jen části plochy spoje

Na uvedených grafech je možné vidět průběh trhací zkoušky nejen lepených, ale i hybridních spojů. U hybridních spojů, tj. vzorků C, D, E, F, G, je možné si všimnout pozvolného nárůstu zatěžující síly a pak jejího velkého poklesu, který je způsoben roztržením lepeného spoje (vyčerpáním plasticity lepidla). Následně velikost zatěžující síly velmi mírně narůstá, což je způsobeno zatěžováním už pouze svarového spoje, který je stále funkční. Po zvýšení zatěžující síly nad určitou mez však dochází i k jeho přetržení (vyčerpání plasticity svaru). Tento průběh je u hybridních spojů žádoucí, protože při ztrátě funkčnosti jednoho typu spoje je stále aktivní druhý typ spoje. U vzorků A a B se takový vývoj zatěžující síly neukazuje, protože se jedná pouze o lepený spoj a po jeho přetržení jsou vzorky již od sebe odděleny.

Tab. 5 Maximální síla nutná k přetržení vzorku.

Vzorek	A	B	C	D	E	F	G
F_{max1} [N]	8 971	6758	9 762	4734	7843	7 166	6281
F_{max2} [N]	8 586	6409	11 482	5819	8925	9 019	6465
F_{max3} [N]	10285	5561	9853	10024	8337	6 367	7402
$F_{max\ prům.}$ [N]	9281	6243	9808	6859	8368	7517	6716

U vzorku C se F_{max2} do výpočtu průměrné hodnoty nezapočítává, protože nedošlo k roztržení vzorku v místě svaru, ale k roztržení v plném materiálu – mimo svarový či lepený spoj.

Při zjednodušené analýze přeplátovaného spoje se předpokládá, že smykové napětí je rovnoměrně rozloženo ve vrstvě lepidla po celé délce přeplátování. Z této úvahy vyplývá stanovení smykového napětí v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných spojích. Smykové napětí spoje τ_s se pak rovná podílu zatížení spoje při porušení a jeho plochy, viz vztahy (4.1 - 4.3). [53]

$$\tau_s = \frac{F_{max}}{S}\ [MPa], \tag{4.1}$$

$$S = a \cdot b\ [mm^2], \tag{4.2}$$

kde: F_{max} – maximální síla při zatěžování [N]
S – plocha lepeného spoje [mm^2]
a – délka lepeného spoje [mm]
b – šířka lepeného spoje [mm].

Lze tedy psát:

$$\tau_s = \frac{F_{max}}{a \cdot b}\ [MPa] \tag{4.3}$$

Podle těchto vztahů se určila velikost smykového napětí jednotlivých vzorků, které uvádí tab. 6. Rozměry lepené plochy se určovaly ze vzorků, přičemž se měřila vždy jen ta část, v které došlo k porušení lepidla. Např. u vzorků F došlo k přetržení v polovině přeplátování, do výpočtu se tedy zahrnula poloviční plocha než např. u vzorků A, u kterých došlo k přetržení v celé ploše přeplátování.

Tab. 6 Maximální smykové napětí u vzorků při tahové zkoušce.

Vzorek	A	B	C	D	E	F	G
τ_{s1} [MPa]	9,0	9,7	9,8	6,8	11,2	14,3	9,0
τ_{s2} [MPa]	8,6	9,2	11,5	8,3	12,8	18,0	9,2
τ_{s3} [MPa]	10,3	7,9	9,9	14,3	11,9	12,7	10,6
$\tau_{s\ prům.}$ [MPa]	9,3	8,9	9,8	9,8	12,0	15,0	9,6

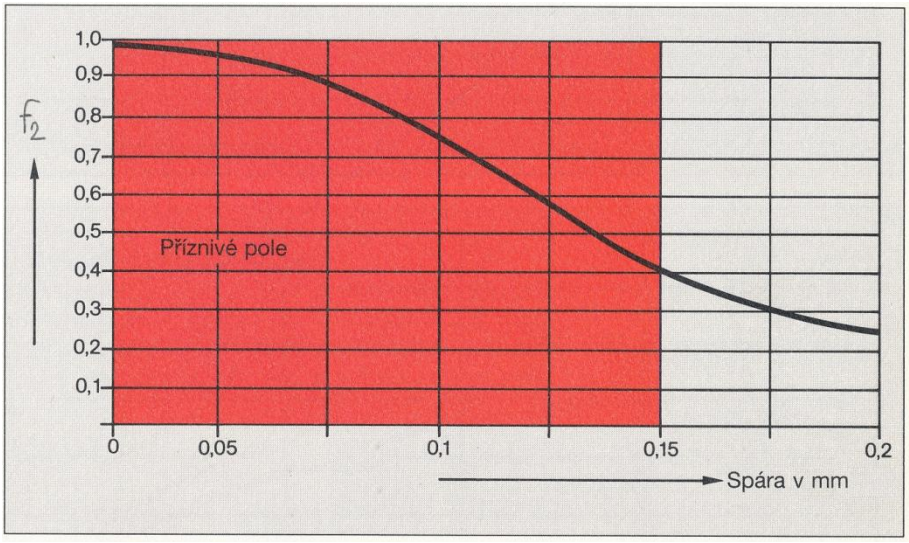
Do reálného spoje však vstupuje mnoho různých vlivů, které je nutné při výpočtu zohlednit, protože mají dopad na velikost smykového napětí. Tyto vlivy zohledňuje celkový faktor $f_{celk.}$, jehož velikost se určí dle vztahu (4.4) [54].

$$f_{celk.} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \cdot f_8 \qquad (4.4)$$

kde: f_1 – faktor druhu materiálu
f_2 – faktor velikosti spáry
f_3 – faktor drsnosti povrchu
f_4 – faktor velikosti spojované plochy
f_5 – faktor směru zatížení
f_6 – faktor druhu zatížení
f_7 – faktor provozní teploty
f_8 – faktor způsobu vytvrzení lepidla

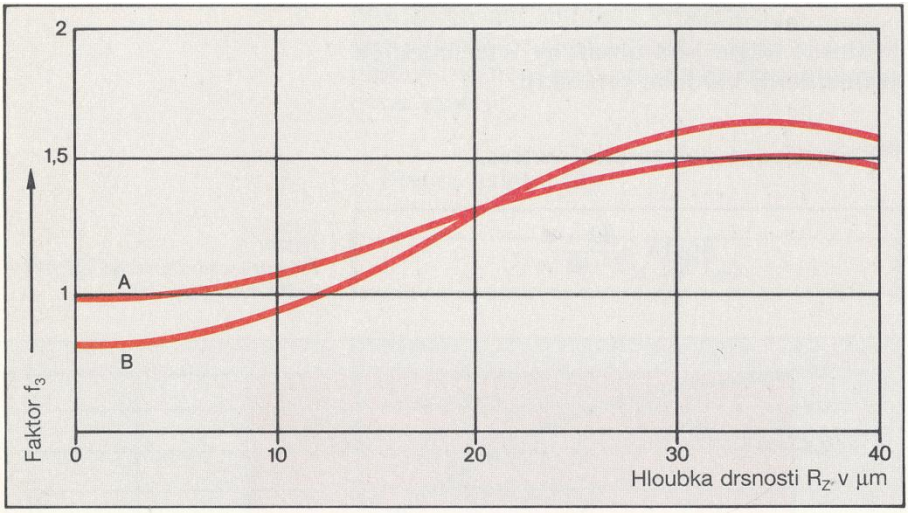
Faktor druhu materiálu f_1 se stanovuje především pro anaerobní lepidla, protože jejich vytvrzování může být ovlivněno katalytickým chováním kovů. Toto epoxidovým lepidlům nehrozí, pro epoxidová lepidla a spojení materiálů ocel – ocel je tedy faktor f_1 roven 1.

Faktor velikosti spáry f_2 se stanoví z grafu na obr. 51. Optimální velikost spáry pro lepení je mezi 0,03 - 0,05 mm. V tomto rozsahu je pevnost ve smyku největší. Se zvyšující se velikostí spáry se pevnost výrazně snižuje.



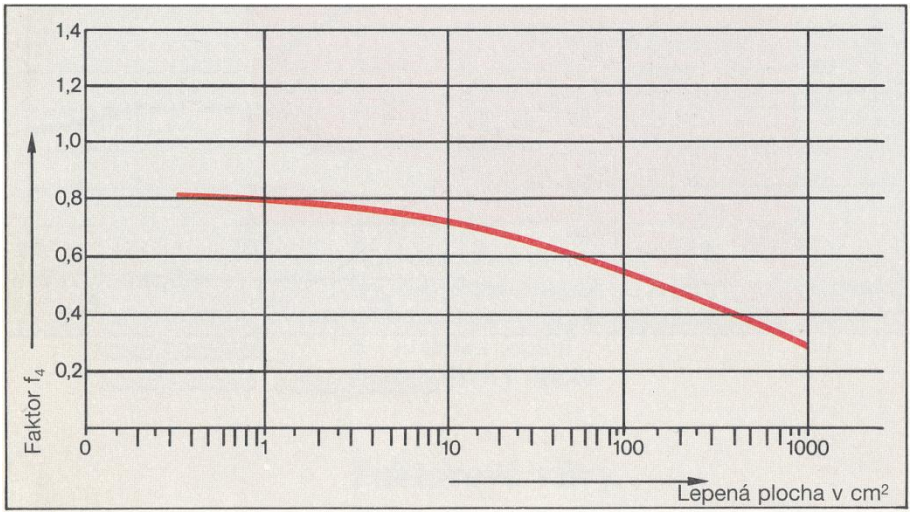
Obr. 51 Závislost velikosti faktoru f_2 na velikosti spáry [54]

Faktor drsnosti povrchu f_3 se určí z grafu na obr. 52. Je na něm vyznačena část, která je pro lepení nejvýhodnější. U lepených spojení se příznivá hloubka drsnosti R_z pohybuje mezi 15 - 40 μm. V případě větší hloubky drsnosti než 40 μm vzniká nebezpečí, že nedojde k dokonalému smáčení celé plochy a může se tak projevit vrubový účinek.



Obr. 52 Závislost velikosti faktoru f_3 na hloubce drsnosti [54]

Faktor velikosti spojované plochy f_4 se stanoví z grafu na obr. 53 a zohledňuje různé rozložení napětí po celé délce přeplátovaného spoje.



Obr. 53 Závislost velikosti faktoru f_4 na velikosti lepené plochy [54]

Faktor směru zatížení f_5 se určuje pouze u spojů obráběných válcových ploch, kde se rozlišuje axiální nebo radiální zatížení. U přeplátovaných spojů je tento faktor roven 1.

Faktor druhu zatížení f_6 zahrnuje různé typy zatížení a jejich vliv na únavu materiálu. Jeho velikost lze stanovit z tab. 7.

Tab. 7 Velikost faktoru f_6 pro různé druhy zatížení [54].

Druh zatížení	Velikost f_6
čistě statické zatížení	1
míjivé zatížení	0,7
dynamické trvalé střídavé zatížení	0,2 - 0,5

Faktor provozní teploty f_7 se stanoví ze vztahu (4.5) [54]. Ideální provozní teplota většiny používaných lepidel je pokojová (cca 20°C), při které dosahují lepidla nejvyšší pevnosti. Se stoupající teplotou pevnost lepeného spoje plynule klesá. Tento pokles zohledňuje faktor f_7. Pro jednotlivá lepidla se relativní pevnost určí z jejich materiálového listu, kde je uvedena relativní pevnost v závislosti na teplotě nasazení.

$$f_7 = \frac{\text{relativní pevnost v \%}}{100} \tag{4.5}$$

Faktor způsobu vytvrzení lepidla f_8 závisí především na teplotě, při které je lepidlo vytvrzováno. Při pokojové teplotě je faktor f_8 roven 1, při vyšších teplotách roste.

Výpočet smykového napětí reálného spoje τ_{sr} pak určuje vztah (4.6) [54].

$$\tau_{sr} = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \cdot f_{celk.}\ [\text{MPa}] \tag{4.6}$$

Vzorový výpočet smykového napětí vzorku A1, při zohlednění celkového faktoru, by pak vypadal následovně:

$$f_{celk.} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \cdot f_8$$

kde: $f_1 = 1$ (pro spojení ocel – ocel)
$f_2 = 0{,}95$ (pro velikost spáry 0,05 mm)
$f_3 = 1{,}3$ (pro R_z 20 μm)
$f_4 = 0{,}72$ (pro lepenou plochu 10 cm^2)
$f_5 = 1$ (pro přeplátovaný spoj)
$f_6 = 1$ (pro čistě statické zatížení)
$f_7 = 1$ (pro provozní teplotu 20°C je relativní pevnost 100 %)
$f_8 = 1$ (vytvrzeno při pokojové teplotě),

potom

$$f_{celk.} = 1 \cdot 0{,}95 \cdot 1{,}3 \cdot 0{,}72 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0{,}89\ [-]$$

$$\tau_{sr} = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \cdot f_{celk.}$$

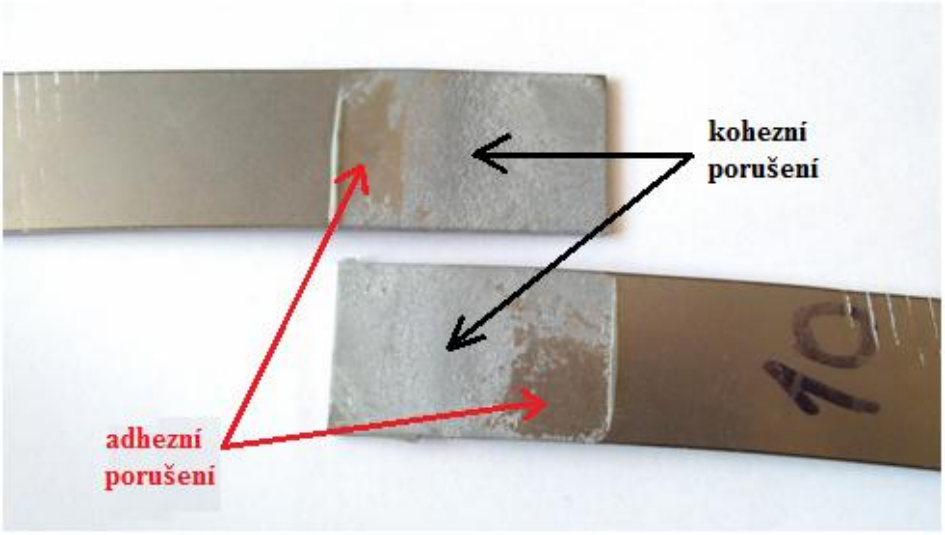
kde: $F_{max} = 8\,971$[N]
a = 40 [mm]
b = 25 [mm]
$f_{celk.} = 0{,}89$ [-],

po dosazení

$$\tau_{sr} = \frac{8\,971}{40 \cdot 25} \cdot 0{,}89 = 7{,}98\ [\text{MPa}].$$

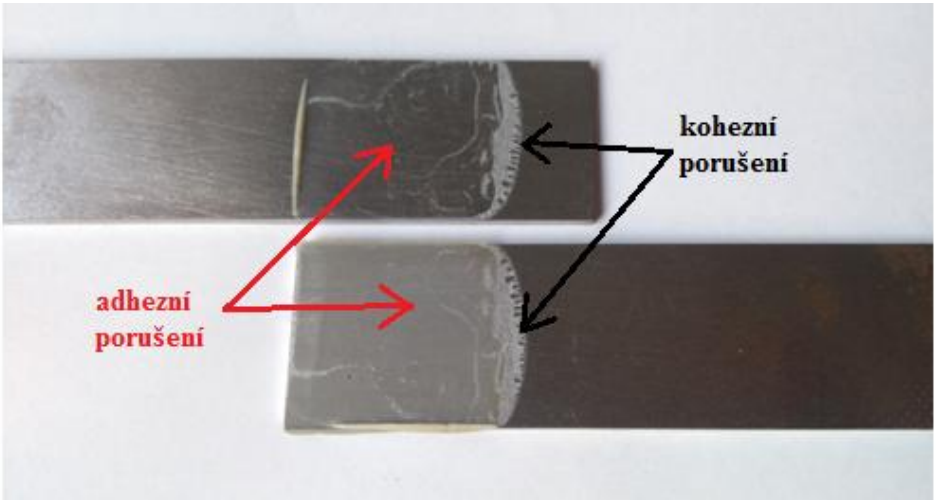
4.4 Hodnocení kvality spojů

Vzorek A je zobrazen po trhací zkoušce na obr. 54. Tento vzorek byl slepen po celé délce přeplátování. Jsou na něm vidět tmavě šedá místa, na kterých došlo k adheznímu porušení. Ve světle šedých oblastech došlo ke koheznímu porušení spoje. Ideální je stav, kdy dojde pouze ke koheznímu porušení, protože je maximálně využitý pevnostní potenciál lepidla.



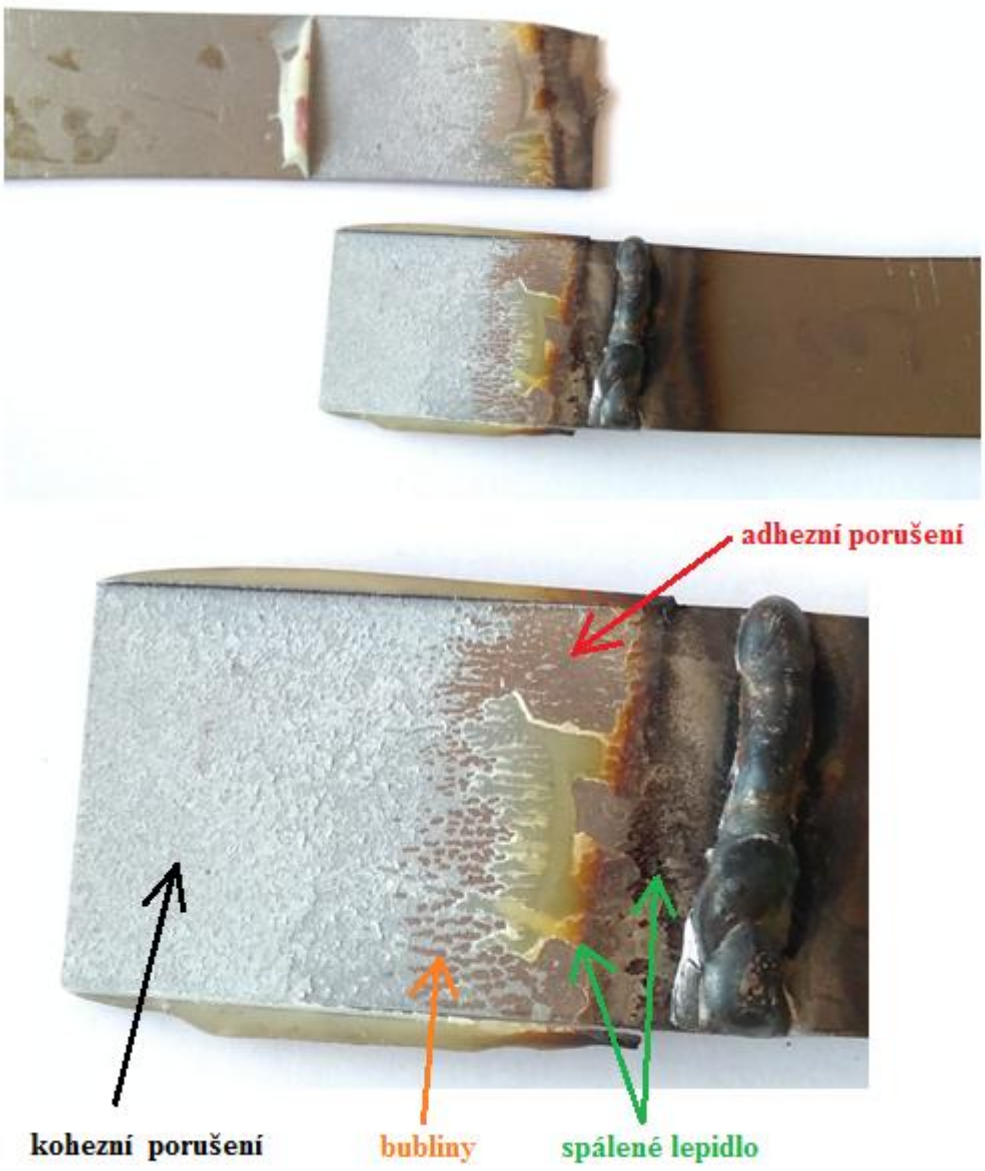
Obr. 54 Vzorek A po experimentální zkoušce

Vzorek B je vidět po trhací zkoušce na obr. 55. Tento vzorek byl slepen pouze na části přeplátované plochy. V převážné části lepeného spoje došlo k adheznímu porušení. K tomuto způsobu porušení došlo kvůli špatné přilnavosti lepidla k povrchu vzorku. Je to zapříčiněno špatnou úpravou povrchu vzorku, tzn. špatným odmaštěním nebo špatným zdrsněním povrchu vzorku.



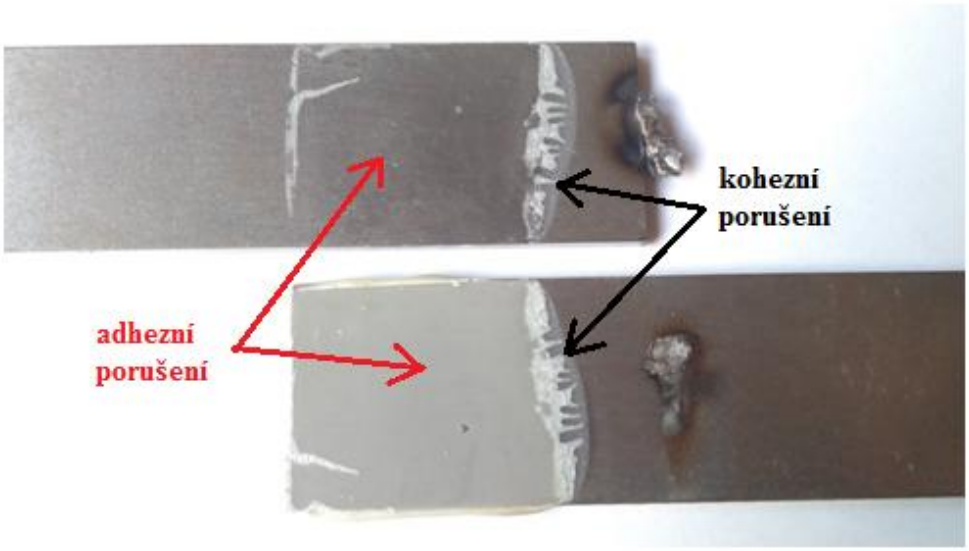
Obr. 55 Vzorek B po experimentální zkoušce

Vzorek C je po trhací zkoušce zobrazen na obr. 56. Tento vzorek byl slepen po celé délce přeplátování a po vytvrzení lepidla svařen metodou MAG. Během svařování vzorku byl oblouk nestabilní, svařování bylo díky vrstvě lepidla velmi obtížné. V blízkosti MAG svaru (v tepelně ovlivněné zóně) si lze všimnout obrovských černých nebo hnědých oblastí spáleného lepidla. Oproti správně vytvrzenému lepidlu dosahuje spálené lepidlo výrazně nižší pevnosti nebo ji dokonce i ztrácí. Spálením lepidla se výrazně naruší adheze k adherendu, vlastní soudržnost lepidla je však také narušena, ale o něco méně. V lepidle v okolí svaru se nachází velké množství bublin, které vzniky v důsledku unikajících plynů během svařování ze svaru nebo odpařováním lepidla. Spálené lepidlo a bubliny jsou tedy nežádoucí, protože snižují pevnost celého spoje. Je tedy nutné se v praxi oběma těmto vadám vyhnout.



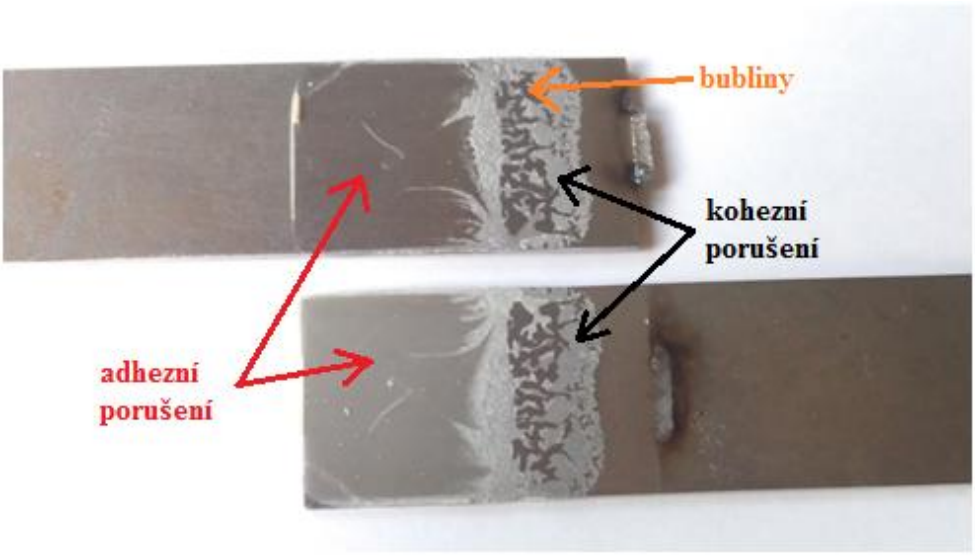
Obr. 56 Vzorek C po experimentální zkoušce

Vzorek D po trhací zkoušce zobrazuje obr. 57. Vzorek byl slepen pouze v části přeplátování a po vytvrzení lepidla byl proveden MAG svar. Je na něm vidět velká lomová plocha, na které došlo k adheznímu porušení. Lepidlo však není vůbec ovlivněno MAG svarem. Není zde vidět žádné spálené lepidlo nebo velké množství bublin. V praxi je tedy žádoucí, vytvořit určitou mezeru mezi lepeným a svarovým spojem.

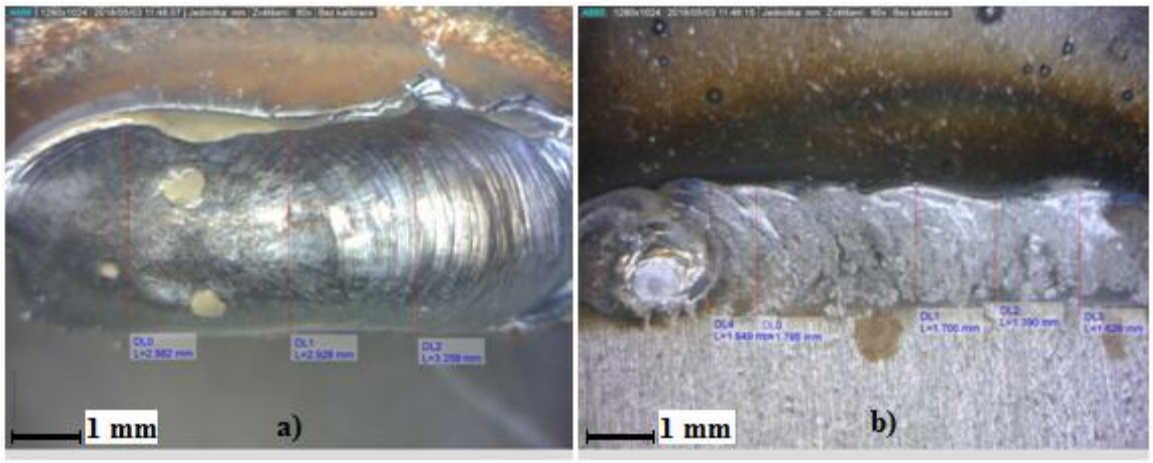


Obr. 57 Vzorek D po experimentální zkoušce

Vzorek E je po trhací zkoušce vidět na obr. 58. Tento vzorek byl slepen a ihned svařen metodou MAG. V blízkosti svaru jsou vidět v lepidle bubliny, které vznikly zřejmě v důsledku unikajících plynů ze svaru. Lepidlo se díky vnesenému teplu mohlo rychleji vytvrdit, nedošlo však k jejímu spálení, protože byla zachována mezera mezi svarem a lepidlem. V převážné části spoje došlo k adheznímu porušení, objevuje se však i kohezní porušení. Při zvětšení oblasti svaru, viz obr. 59, si lze všimnout vhodného provedení svaru bez pórů nebo bublin. Při svařování nedošlo k negativnímu ovlivnění svaru výpary lepidla a nedošlo tak ve svaru ke vzniku bublin.

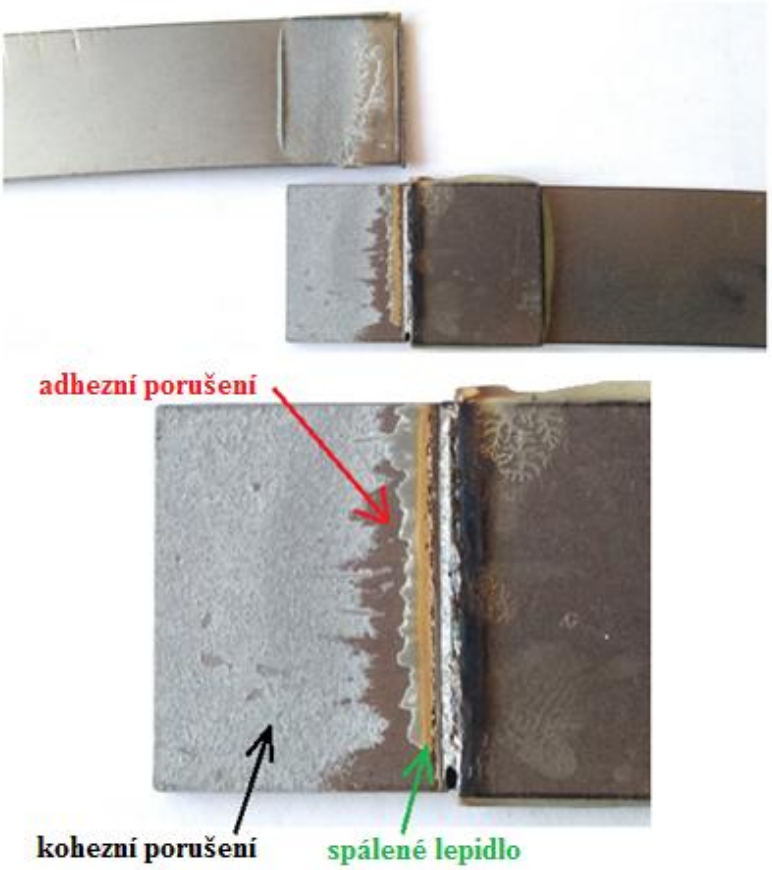


Obr. 58 Vzorek E po experimentální zkoušce

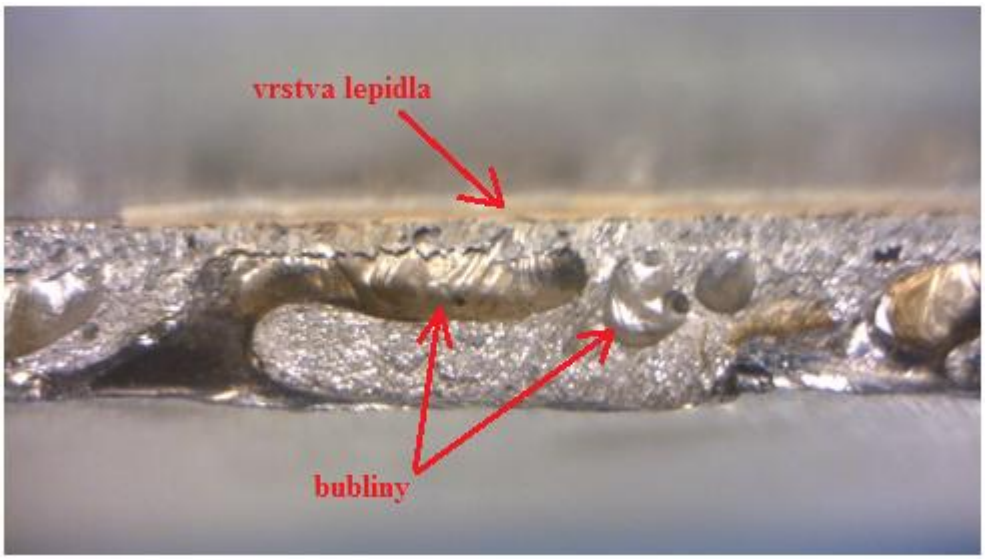


Obr. 59 Vzorek E – detail MAG svaru a) horní, b) spodní díl přeplátovaného spoje

Vzorek F po trhací zkoušce ukazuje obr. 60. Tento vzorek byl slepen po celé délce přeplátování, v jehož polovině byl svařen laserem. V okolí laserového svaru je možné spatřit hnědé pásmo spáleného lepidla. Toto pásmo je však mnohem (cca 4x) menší než u vzorků C, které byly svařovány metodou MAG. U vzorků F se již nevyskytují bublinky v lepidle. Při zvětšení oblasti svaru, viz obr. 61, si lze všimnout vysoké pórovitosti svaru a velkých bublin, které jsou prostoupeny celým svarem. Vznikly díky unikajícím plynům při svařování ze svaru nebo odpařováním lepidla. Pórovitost a bubliny snižují pevnost spoje, jsou tedy nežádoucí a je nutné se jim v praxi vyhnout.

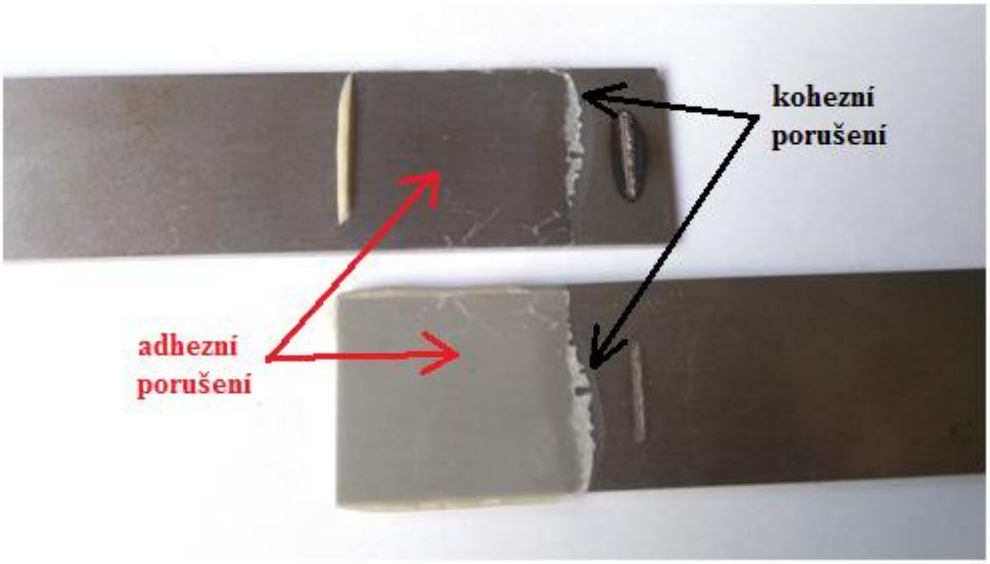


Obr. 60 Vzorek F po experimentální zkoušce

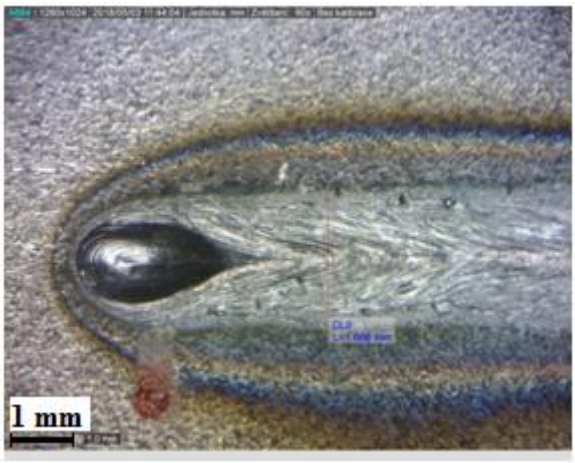


Obr. 61 Vzorek F – detail laserového svaru

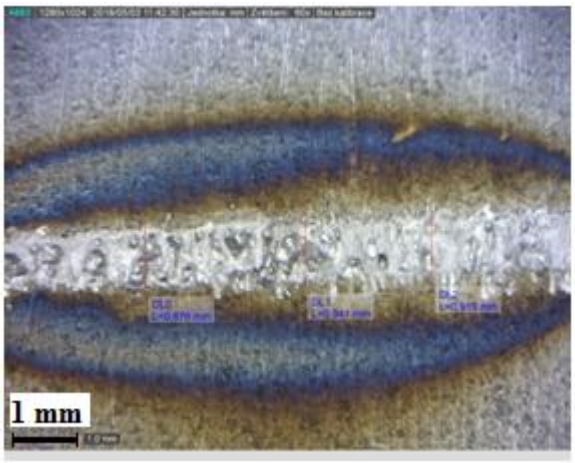
Vzorek G je po trhací zkoušce zobrazen na obr. 62. Vzorek byl slepen pouze v části přeplátování a po vytvrzení lepidla byl proveden laserový svar. Lomová plocha vykazuje adhezní charakter porušení. Lepidlo není laserovým svarem vůbec ovlivněno, nejsou v něm přítomny bubliny a lepidlo není ani spálené. Naopak ani laserový svar není ovlivněn lepidlem. Je tedy vhodné vytvořit mezeru mezi lepidlem a laserovým svarem. Při zvětšení oblasti svaru, viz obr. 63, je možné vidět provedení svaru. Na první pohled je svar vyhovující, po podrobnějším zkoumání jsou v něm však vidět drobné póry a bubliny, které jsou pro kvalitní svar nepřijatelné. Mohly vzniknout při svařování díky mezeře (vytvořené vrstvou lepidla) mezi oběma svařovanými díly.



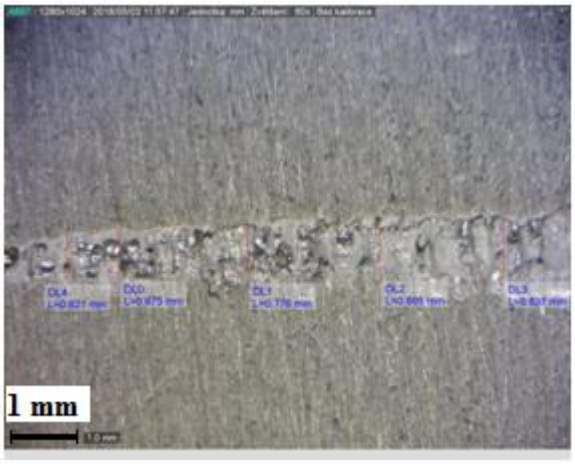
Obr. 62 Vzorek G po experimentální zkoušce



a)



b)



c)

Obr. 63 Vzorek G – detail laserového svaru a) horní díl z vnější strany, b) horní díl z vnitřní strany, c) spodní díl z vnitřní strany

ZÁVĚR

Lepené hybridní spoje patří k vysoce se rozvíjejícím technologiím moderního spojování karoserií. Jde o mechanické nebo tepelné procesy spojování v kombinaci s lepením, kdy se současně využívá primárních výhod obou technologií.

Jejich hlavní výhodou je celkové zvýšení pevnosti a tuhosti spoje, která vede ke snížení hmotnosti karoserie, ale i ke zvýšení její bezpečnosti, na kterou je v dnešní době přikládán čím dál tím větší důraz. Další výhodou hybridních spojů je jejich rychlá aplikace, která je důležitá v dnešních výrobních závodech, kde se za každou sekundu uspoření času ve výrobním procesu ušetří i spousta peněz. I když vytvrzení některých lepidel trvá mnoho hodin, manipulační pevnosti se dosáhne během několika sekund přidáním např. svarového spoje. Použitím lepidel je spoj chráněn proti elektrochemické korozi, čímž se zvyšuje životnost spoje. Mimo jiné se zvyšuje komfort celého automobilu, kdy se snižují vibrace a hluk uvnitř karoserie, v prostoru posádky.

Pro zhotovení hybridních spojů (svařování a lepení) není vhodné provádět svar přímo do místa, kde je naneseno lepidlo. Při svařování dochází ke spálení a degradaci lepidla v tepelně ovlivněné oblasti a v lepidle vznikají nežádoucí bublinky. Svařováním přímo do lepidla se také negativně ovlivňuje kvalita svaru, kdy díky odpařujícímu se lepidlu vznikají ve svaru póry a bubliny. Tyto vady pak snižují pevnost svarového spoje. Při svařování metodou MAG je velikost oblasti se spáleným lepidlem větší než u laserového svařování. Je to z důvodu vyššího vneseného celkového tepla do svaru. Tepelně ovlivněná oblast je tedy větší a degradace lepidla se projeví ve větším pásmu. Je to dáno i použitou technologií, kdy při svařování laserem je teplo do svaru vnášeno na menší plochu než u metody MAG. Svařování přímo do lepidla je tedy nevhodné.

V případě, kdy je mezi lepidlem a svarem určitá mezera, nedochází k negativnímu ovlivnění lepidla ani svaru. U laserového svaru může být tato mezera menší než u MAG svaru, protože celkové vnesené teplo je menší a je soustředěné na menší plochu. Použití laserového svařování je tedy výhodnější, pořizovací náklady a provoz této technologie jsou však finančně náročnější. Důležitá je také úprava lepených povrchů (očištění, odmaštění, zdrsnění), která hraje velikou roli při adhezi lepidla k materiálu. Adhezní lom na roztržených dílech není žádoucí. Ideální je stav, kdy dojde pouze ke koheznímu porušení, protože je maximálně využitý pevnostní potenciál lepidla.

Z výsledků trhací zkoušky vyplývá, že pevnost hybridního spoje je vyšší než pevnost samotného lepeného spoje. Z průběhu zatěžující síly je zřejmé, že nejdříve dojde k prasknutí (vyčerpání plasticity) lepidla a pak až svaru. Tento průběh je u hybridních spojů žádoucí, protože při ztrátě funkčnosti jednoho typu spoje je stále aktivní druhý.

Pro praxi je tedy výhodné používat lepené spoje spolu se svary v případě, když je mezi oběma typy spojení určitá mezera, která zajistí neovlivnění obou technologií navzájem. Svar tak negativně neovlivní lepený spoj a lepidlo negativně neovlivní svarový spoj.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MACHÁČOVÁ, Dana a Pavel MACHÁČ. *Stavba karoserií a skříní* [online]. Kopřivnice: VOŠ, SOŠ A SOU Kopřivnice, 2012 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U27_Stavba_karoserii_a_skrini.pdf
2. VLK, František. *Karosérie motorových vozidel: ergonomika : biomechanika : pasivní bezpečnost : kolize : struktura : materiály*. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5277-9.
3. FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 8. března 2017, (3) [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html
4. Technologie tailored blanks. *MM průmyslové spektrum* [online]. 16. června 2002, (7) [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks.html
5. GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 3., přeprac. vyd. Přeložil Iva MICHŇOVÁ, přeložil Zdeněk MICHŇA, přeložil Jiří HANDLÍŘ. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-17-7.
6. ŠIMON, Petr. *Karosérie osobního automobilu* [online]. Mladá Boleslav: Škoda Auto, 2015 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: http://docplayer.cz/18241549-Karoserie-osobniho-automobilu-ing-petr-simon-skoda-auto-a-s-04-03-2015.html
7. VACULÍK, Martin. Karoserie nového Audi A8: Hliník na ústupu!. *AUTO.CZ* [online]. CZECH NEWS CENTER, 16.4.2017 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: http://www.auto.cz/karoserie-noveho-audi-a8-hlinik-na-ustupu-105526
8. ŠANOVEC, Jan, Tomáš PILVOUSEK. Lehké konstrukce karoserií osobních automobilů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 8. března 2016, (3) [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/lehke-konstrukce-karoserii-osobnich-automobilu.html
9. KAŠPAROVÁ, Eliška. Jediná slévárna hořčíkových slitin v ČR. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 12. února 2014, (1) [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/jedina-slevarna-horcikovych-slitin-v-cr.html
10. NOVÁ, Iva, Jiří MACHUTA. Výrobky z hliníkové pěny. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 18. prosince 2007, (12) [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html
11. ŠANOVEC, Jan. Tvářecí a výrobní procesy ve stavbě lehkých karoserií. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 10. dubna 2013, (4) [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/tvareci-a-vyrobni-procesy-ve-stavbe-lehkych-karoserii.html
12. Jak na to: Lepení. *Údržba vozidla* [online]. Henkel ČR, 2018 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: http://www.udrzba-vozidla.cz/cs/tutorials-new/body-repair/bonding.html

13. ŠANOVEC, Jan. Moderní způsoby spojování dílů karoserie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 17. října 2012, (10) [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-zpusoby-spojovani-dilu-karoserii.html
14. Paint shop. *Audi* [online]. Audi, 2018 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: https://www.audi.co.uk/account/sli-status/22.html
15. Povrchové úpravy v autoprůmyslu – Škoda Superb. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 13. října 2004, (10) [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-v-autoprumyslu-skoda-superb.html
16. KOUKAL, Jaroslav a kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
17. AMBROŽ, Oldřich a kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. 2., upr. vyd. Ostrava ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0
18. KHOREL, Ladislav. *Kovové materiály a polotovary pro výrobu karoserií* [online]. Vysoké Mýto: Integrovaná střední škola technická, 2013 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: http://slideplayer.cz/slide/1995383/#
19. MIG/MAG svařování. *Fronius* [online]. Fronius, ©2006-2018 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: https://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-71E46BEB-69CB4889/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3916.htm#.WtOoKX9pErm
20. HAVELKA, Pavel. MIG/MAG (CO2). *Automig internetový magazín* [online]. Migatronic CZ [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/
21. BARTÁK, Jiří a kolektiv autorů. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*, 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.
22. ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou*, 1. vyd. Bratislava: ETERNA PRESS, 2003. ISBN 80-968359-5-5.
23. CMT: tři písmena za kterými se ukrývá nejstabilnější svařovací proces na světě. *Fronius* [online]. Fronius, ©2006-2018 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: http://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-246912E3-8142A0D/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_10724.htm#.WtRQ0n9pErn
24. CMT. *Fronius* [online]. Fronius, ©2006-2018 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: https://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-452E6C16-72D122C8/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3917.htm#.WtRRd39pErl
25. ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ. *Rockweld* [online]. Realizace & Webdesign, ©2013 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: http://www.rockweld.cz/odporove-svarovani/
26. Elektrické odporové svařování. *Eluc.kr-olomoucky* [online]. ELUC [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1808
27. RAYNOCH, Jindřich. *Svařování* [online]. 2012 [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: http://docplayer.cz/6977262-Svarovani-osnova-uciva-historie-svareni-zaklady-svarovani.html

28. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK, Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
29. KOŘÁN, Pavel. Základní princip laseru a jejich dělení. *Seriál na téma lasery* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2013, 19.2.2013 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princtip-laseru-127
30. KOŘÁN, Pavel. Laserové svařování i (laser welding). *Seriál na téma lasery* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2013, 18.2.2013 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134
31. Fyzikální metody ve svařování. *Eluc.kr-olomoucky* [online]. ELUC [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1809
32. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvárania*, 1vyd. Bratislava: ALFA, 1989. ISBN 80-05-000097-9.
33. KUBÁLEK, Jaroslav. Pájení kovů. *Konstrukce - odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství: Svařování a dělení* [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, ©2002-2018, 27.11.2012 [cit. 2018-02-27]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: http://www.konstrukce.cz/clanek/pajeni-kovu/
34. Svařované a pájené spoje na částech karoserie zhotovené zdrojem STT II (výsledky zkoušek). *Czweld* [online]. Medlešice: CZ WELD [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: http://www.czweld.cz/oc_vysledky_zkousek.htm
35. HAVELKA, Pavel. MIG pájení pozinkovaných autokarosářských dílů. *Automig internetový magazín* [online]. Migatronic CZ [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: http://automig.cz/o-svarovani/metody/mig-pajeni-mig-brazing/
36. Mikropájení a makropájení laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 8. října 2003, (10) [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/mikronapajeni-a-makropajeni-laserem.htmlhttp://dp.bajaja.net/06.html#6-C
37. Doplňkové technologie pro zpracování plastů. *Ksp.tul* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm
38. OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. Polytechnická knižnice (SNTL).
39. Základy teorie lepení. In: *Fakulta strojní ČVUT v Praze* [online]. Poradenské centrum společnosti LEAR [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf
40. HRUŠKOVÁ, Markéta. *Technologie lepení v automobilovém průmyslu* [online]. 2016 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://docplayer.cz/15914594-Technologie-lepeni-v-automobilovem-prumyslu.html
41. ŠTRKAŇ, Jan, KUBĚNA, Jiří a Petr, BRIŠ. *Lepení v praxi*. Praha Grada, 2017. ISBN 978-80-271-0247-1.

42. VAŠÍČEK, Emil. *Adheze* [online]. Otrokovice: Střední odborná škola Otrokovice, 2013 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: http://slideplayer.cz/slide/3106804/
43. *Loctite* [online]. Praha: Henkel ČR, ©2018 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://www.loctite.cz/homepage.htm
44. *Sika* [online]. Brno: Sika CZ, ©2018 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: https://cze.sika.com/cs/group.html
45. PILVOUSEK, Tomáš, Lubomír ROLEČEK a Jan ŠANOVEC. Lepení ve výrobě karoserie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 27. června 2017, (7) [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/lepeni-ve-vyrobe-karoserie.html
46. GREGOR, Miroslav. Lepení kovů. *Lepidla* [online]. Olivětín: Z - TRADE, ©2013-2016 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: https://www.lepidla.cz/cs/a/lepeni-kovu.html
47. OSTEN, Miloš a Josef MLEZIVA. *Práce s lepidly a tmely*. Praha: Grada, 1996. Profi & hobby. ISBN 80-7169-338-3.
48. ZÁRUBA, Jiljí. Lepidla a lepení různých materiálů: dřeva, kovu, plastů. *Ireceptar* [online]. VIZUS & Tarsago, ©2018, únor 2014 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://www.ireceptar.cz/pro-kutily/postupy-a-navody/lepidla-a-lepeni-ruznych-materialu-dreva-kovu-plastu/
49. *Pružné lepení dřevěných podlah* [online]. Brno: Sika CZ, 2004 [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://docplayer.cz/6922557-Construction-sikabond-pruzne-lepeni-drevenych-podlah-sika-cz-s-r-o.html
50. Výrobní program. *Pásová ocel* [online]. Karlštejn: Pásová ocel, 2013 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: http://www.pasovaocel.cz/vyro_kla.htm
51. *SPT Epoxy® 0215*. Brno: Sourcing Point Technology.
52. TransSteel 2200c Set/EF. *Cesva* [online]. Teplice - Soběděruhy: Cesva [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: http://www.cesva.cz/TransSteel-2200c-Set-EF-d273.htm
53. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
54. *Der Loctite*. Mnichov: LOCTITE Europa, 1988.
55. *MTS Criterion Series 40 Specifications*. Eden Prairie, 2015. Dostupné také z: http://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_2011281.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ABS	[-]	Kopolymer akrylonitril - butadien - styren
AHSS	[-]	Speciální vysokopevnostní ocel
CMT	[-]	Cold Metal Transfer
EP	[-]	Epoxidové pryskyřice
EPDM	[-]	Polypropylen modifikovaný kaučukem
HSS	[-]	Vysokopevnostní ocel
LASER	[-]	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LSS	[-]	Hlubokotažná ocel
MAG	[-]	Metal Active Gas
MF	[-]	Melanimformaldehydová pryskyřice
MIG	[-]	Metal Inert Gas
MS - polymery	[-]	Polymery na bázi modifikovaného silanu
Nd:YAG	[-]	Ytrium aluminium granát dopovaný atomy neodymu
PA	[-]	Polyamidy
PBTP	[-]	Polytereftalát
PC	[-]	Polykarbonát
PE	[-]	Polyethylen
PF	[-]	Fenolformaldehydová pryskyřice
PHS	[-]	Za tepla tvářená vysokopevnostní ocel
PP	[-]	Polypropylen
PS	[-]	Polystyren
PU Pu-RIM	[-]	Polyuretan - reakčně vstřikovaný
PU-PRIM	[-]	Polyuretan - zesílený
PU-TPU	[-]	Polyuretan - termoplastický
PVC	[-]	Polyvinylchlorid
SB	[-]	Styren - butadien
UHSS	[-]	Ultra vysokopevnostní ocel
ULSAB	[-]	Ultra Light Steel Auto Body
UP	[-]	Nenasycený polyester

Symbol	Jednotka	Popis
$\mathbf{A_{80}}$	[%]	Tažnost
$\mathbf{F_{max}}$	[N]	Maximální síla při zatěžování
$\mathbf{F_{max\ prům.}}$	[N]	Průměrná maximální síla při zatěžování vzorků
$\mathbf{F_{max1}}$	[N]	Maximální síla při zatěžování 1. vzorku
$\mathbf{F_{max2}}$	[N]	Maximální síla při zatěžování 2. vzorku
$\mathbf{F_{max3}}$	[N]	Maximální síla při zatěžování 3. vzorku
HV	[HV]	Tvrdost podle Vickerse
$\mathbf{R_e}$	[MPa]	Pevnost na mezi kluzu
$\mathbf{R_m}$	[MPa]	Pevnost při přetržení
$\mathbf{R_z}$	[μm]	Maximální výška profilu
S	[mm^2]	Plocha lepeného spoje
a	[mm]	Délka lepeného spoje
b	[mm]	Šířka lepeného spoje
$\mathbf{f_1}$	[-]	Faktor druhu materiálu
$\mathbf{f_2}$	[-]	Faktor velikosti spáry
$\mathbf{f_3}$	[-]	Faktor drsnosti povrchu
$\mathbf{f_4}$	[-]	Faktor velikosti spojované plochy
$\mathbf{f_5}$	[-]	Faktor směru zatížení
$\mathbf{f_6}$	[-]	Faktor druhu zatížení
$\mathbf{f_7}$	[-]	Faktor provozní teploty
$\mathbf{f_8}$	[-]	Faktor způsobu vytvrzení lepidla
$\mathbf{f_{celk.}}$	[-]	Celkový faktor
$\boldsymbol{\tau_s}$	[MPa]	Smykové napětí
$\boldsymbol{\tau_{s\ prům.}}$	[MPa]	Průměrné maximální smykové napětí při zatěžování vzorků
$\boldsymbol{\tau_{s1}}$	[MPa]	Maximální smykové napětí při zatěžování 1. vzorku
$\boldsymbol{\tau_{s2}}$	[MPa]	Maximální smykové napětí při zatěžování 2. vzorku
$\boldsymbol{\tau_{s3}}$	[MPa]	Maximální smykové napětí při zatěžování 3. vzorku
$\boldsymbol{\tau_{sr}}$	[MPa]	Smykové napětí reálného spoje

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Tloušťky plechů [mm] – Škoda Octavia III [3] 12
Obr. 2 Materiálový koncept karoserie modelu ŠKODA Octavia III [3] 13
Obr. 3 Využití technologie Tailored blanks při výrobě a) vnějšího boku karoserie b) B-sloupku [5], [6] 14
Obr. 4 Složení rámu z více materiálů – Audi Space Frame pro A8 IV. Generace [7] 15
Obr. 5 Výztuha prahů automobilů Ferrari z pěnového hliníku ALULIGHT [9] 15
Obr. 6 Různé metody spojování karoserie [7] 17
Obr. 7 Rozložení napětí při různých metodách spojování [12] 18
Obr. 8 Jednotlivé vrstvy povrchové úpravy karoserie [6] 18
Obr. 9 Nanášení finálního odstínu karoserie pomocí robotů [14] 19
Obr. 10 Hybridní lepený spoj [13] 20
Obr. 11 Zařízení pro MIG/MAG svařování [20] 22
Obr. 12 Pohyb drátu při svařování metodou CMT [23] 22
Obr. 13 Schéma bodového svařování [27] 23
Obr. 14 Schéma švového svařování [27] 23
Obr. 15 Schéma výstupkového svařování [27] 24
Obr. 16 Schéma vzniku laserového paprsku [29] 25
Obr. 17 Obecné schéma laseru [29] 25
Obr. 18 Vláknový laser YLR-20000 s výkonem 20 kW [30] 26
Obr. 19 a) kondukční, b) penetrační režim svařování [30] 27
Obr. 20 Pájený přeplátovaný spoj na pozinkovaném plechu [34] 28
Obr. 21 Příklady lepených spojů ve stavbě karoserie [37] 29
Obr. 23 Mechanický spoj [42] 31
Obr. 22 Elektrostatické pole [42] 30
Obr. 25 Typy porušení lepeného spoje [42] 32
Obr. 24 Adheze a koheze v lepeném spoji [37] 31
Obr. 26 Závislost úhlu smáčivosti na smáčení lepeného materiálu lepidlem [37] 32
Obr. 27 Aplikace epoxidových pryskyřic v konstrukci karoserie [45] 33
Obr. 28 Příklad konstrukčního řešení lepeného spoje v lemu bočních dveří [45] 34
Obr. 29 Aplikace pružného lepidla [12] 34
Obr. 30 Robotické nanášení lepidla pomocí tlakové trysky [45] 34
Obr. 31 Rozložení napětí ve spoji při použití a) tuhého b) pružného lepidla [49] 35
Obr. 32 Vhodné situování lepených spojů [46], [48] 36
Obr. 33 Rozměry vzorků a velikost přeplátování v [mm] 38
Obr. 34 Vzorek A 38
Obr. 35 Vzorek B 39
Obr. 36 Vzorek C 39
Obr. 37 Vzorek D, E 39
Obr. 38 Vzorek F 40
Obr. 39 Vzorek G 40
Obr. 40 Dole - očištěný, vybroušený a odmaštěný vzorek, nahoře - neupravený vzorek 41
Obr. 41 Kartuše lepidla SPT Epoxy 0215 ve vytlačovací pistoli 41
Obr. 42 Nanesení tenké vrstvy lepidla na vzorek 42
Obr. 43 Vývin pevnosti ve smyku v čase při vytvrzování [51] 42
Obr. 44 Slepené vzorky 43
Obr. 45 Svařovací zdroj TransSteel 2200 [52] 43
Obr. 46 Slepený a následně svařený vzorek E 44

Obr. 47 Slepený a následně svařený vzorek G 44
Obr. 48 a) Trhací zařízení – vlevo b) vzorek upnutý do čelistí – vpravo 45
Obr. 49 Průběhy trhací zkoušky pro 1. skupinu vybraných vzorků – lepení po celé ploše spoje 46
Obr. 50 Průběhy trhací zkoušky pro 2. skupinu vybraných vzorků – lepení jen části plochy spoje 46
Obr. 51 Závislost velikosti faktoru f_2 na velikosti spáry [54] 48
Obr. 52 Závislost velikosti faktoru f_3 na hloubce drsnosti [54] 49
Obr. 53 Závislost velikosti faktoru f_4 na velikosti lepené plochy [54] 49
Obr. 54 Vzorek A po experimentální zkoušce 51
Obr. 55 Vzorek B po experimentální zkoušce 51
Obr. 56 Vzorek C po experimentální zkoušce 52
Obr. 57 Vzorek D po experimentální zkoušce 53
Obr. 58 Vzorek E po experimentální zkoušce 53
Obr. 60 Vzorek F po experimentální zkoušce 54
Obr. 59 Vzorek E – detail MAG svaru a) horní, b) spodní díl přeplátovaného spoje 54
Obr. 61 Vzorek F – detail laserového svaru 55
Obr. 62 Vzorek G po experimentální zkoušce 55
Obr. 63 Vzorek G – detail laserového svaru a) horní díl z vnější strany, b) horní díl z vnitřní strany, c) spodní díl z vnitřní strany 56

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Různé provedení karoserií automobilů [2]. 11
Tab. 2 Druhy plastů a jejich použití v automobilech [2]. 16
Tab. 3 Množství svarů a jiných spojů na jednotlivých modelech automobilů Škoda [3]. 21
Tab. 4 Mechanické a chemické vlastnosti oceli DC01 [50]. 37
Tab. 5 Maximální síla nutná k přetržení vzorku. 47
Tab. 6 Maximální smykové napětí u vzorků při tahové zkoušce. 48
Tab. 7 Velikost faktoru f_6 pro různé druhy zatížení [54]. 50

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Materiálový list lepidla SPT Epoxy 0215 [51]
Příloha 2 Technické informace trhacího zařízení MTS Criterion Model 43 [55]

Sourcing Point Technology, s.r.o
Holandská 878/2
639 00 Brno - Štýřice

SOURCING POINT TECHNOLOGY

SPT Epoxy® 0215

Použití

SPT Epoxy 0215 je pastovité dvousložkové lepidlo. Vytvrzující jak při pokojové, tak zvýšené teploty. Vhodné pro lepení sklolaminátů, kovů a dalších materiálů. Možno také použít jako tmel pro vyplňování spár o max. tloušťce 10 mm.

Speciální vlastnosti

SPT Epoxy 0215 se vyznačuje výbornou pevností ve smyku, tepelnou odolností a odolností vůči slané vodě.

Druh

dvousložkové epoxidové lepidlo/tmel

Způsob použití

Před lepením je nutno lepený materiál (substrát) řádně odmastit (např. aceton čistý, isopropanol). Následně definovaně zdrsnit lepený povrch a znovu očistit. Postup přípravy povrchu lepení je nutné odzkoušet.

Složky se smíchají v následujícím poměru (A:B):

- objemově: 1:1
- hmotnostně: 1:1

Předepsaný mísící poměr je nutno dodržet s přesností 1 % složky B na složku A. Pro dokonalé promíchání je vhodné použít směšovací zařízení, pokud není k dispozici, nutno důkladné promíchat (zejména u stěn a na dně nádoby). Lepidlo se nanese na jednu nebo obě předem upravené plochy, a to v optimální tloušťce 0,05 – 1 mm. Životnost namíchaného lepidla při 25°C je 30-40 minut (ve 100 g).

Při prvním použití nové kartuše, kdy písty kartuše a pistole nejsou srovnané, může zpočátku dojít k vytlačení jen jedné komponenty. Proto je nutné před započetím lepení alespoň jeden objem mixeru vytlačit a zneškodnit.

SPT Epoxy 0215 vytvrzuje již při pokojové teplotě. Systém začne tuhnout cca po 60-90 minutách. Dostatečnou pevnost pro manipulaci získá po 4 hodinách. Maximální pevnost lepidlo získá po 48 hodinách vytvrzování při pokojové teplotě. Vytvrzování je možné urychlit pomocí zvýšené teploty, např.:

- 60 min/80°C
- 20 min/120°C

Objednávky: logistika@sptechnology.cz
Administrativa: office@sptechnology.cz
Laboratoř: laborator@sptechnology.cz

IČ: 01980131
DIČ: CZ01980131
Bank connection: 263608261/0300

Sourcing Point Technology, s.r.o
Holandská 878/2
639 00 Brno - Štýřice

SPT SOURCING POINT TECHNOLOGY

Technická data

A. SPT Epoxy 0215 (složka A)

Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice

Vlastnost	Metodika kontroly	Charakteristická hodnota
Vzhled	vizuální	nahnědlá tixotropní pasta
Měrná hmotnost	ISO I675 /SN 656I99/	1,49 -1,54 g/cm^3
Epoxidový ekvivalent		0,44-0,46 mol/100 g

B. SPT Epoxy 0215 (složka B)

Vlastnosti tvrdidla

Vlastnost	Metodika kontroly	Charakteristická hodnota
Vzhled	vizuální	nažloutlá tixotropní pasta
Měrná hmotnost	ISO I675 /SN 656I99/	1,40-1,45 g/cm^3

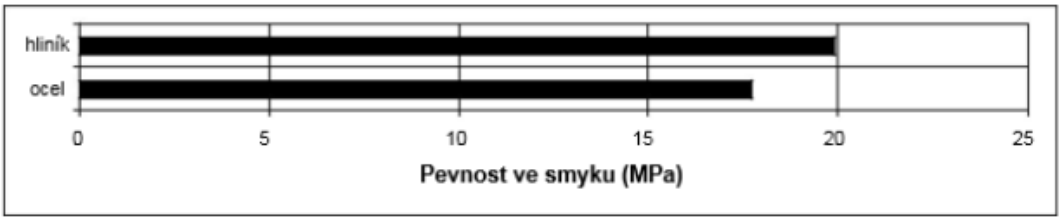
C. Vlastnosti lepeného spoje po vytvrzení:

Měrná hmotnost	ISO I675 /SN 656I99/	1,45-1,50 g/cm^3
T_g (48 hod při pok. tep.)	DSC	55-60 °C
T_g (max)	DSC	77 °C

Mechanické vlastnosti

Pevnost ve smyku na kovech:

- metoda: ČSN EN 1465
- vytvrzení: 24 hodin/23°C + 1 hodina/80°C
- testováno při 23°C



Objednávky: logistika@sptechnology.cz
Administrativa: office@sptechnology.cz
Laboratoř: laborator@sptechnology.cz

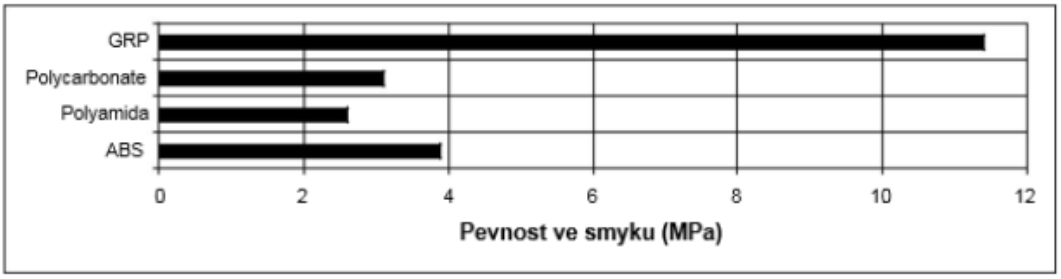
IČ: 01980131
DIČ: CZ01980131
Bank connection: 263608261/0300

Sourcing Point Technology, s.r.o
Holandská 878/2
639 00 Brno - Štýřice

SPT SOURCING POINT TECHNOLOGY

Pevnost ve smyku na plastech:

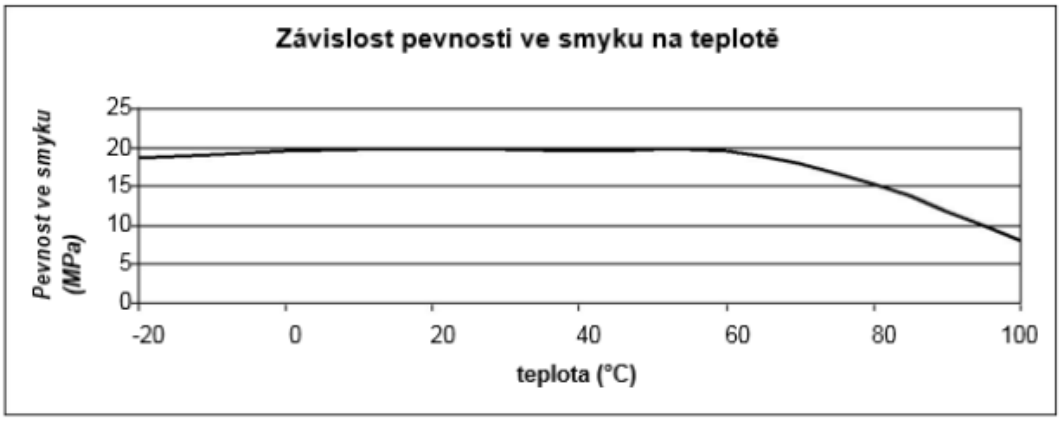
- vytvrzení: 24 hodin/23°C + 1 hodina/80°C
- úprava povrchu: odmaštění iso-propanolem a lehce zbroušen
- testováno při 23°C



Pevnost ve smyku při různých teplotách:

- metoda: ČSN EN 1465
- vytvrzení: 24 hodin/23°C + 1 hodina/80°C
- materiál: hliníkový plech o šířce 25 mm a tloušťce 1,6 mm

3



Pevnost v odlupu (přes válečky): 4,2 N/mm

- vytvrzení: 24 hodin/23°C + 1 hodina/80°C
- materiál: hliníkový plech 150x30x0,6 mm
- testováno při 23°C

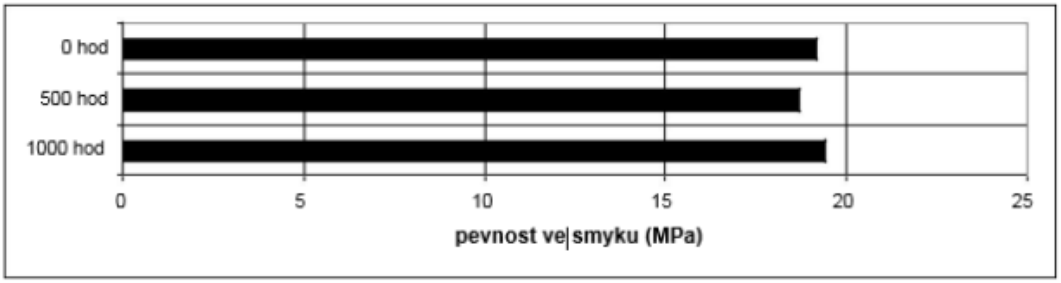
PŘÍLOHA 1 (4/6)

Sourcing Point Technology, s.r.o
Holandská 878/2
639 00 Brno - Štýřice

SOURCING POINT TECHNOLOGY

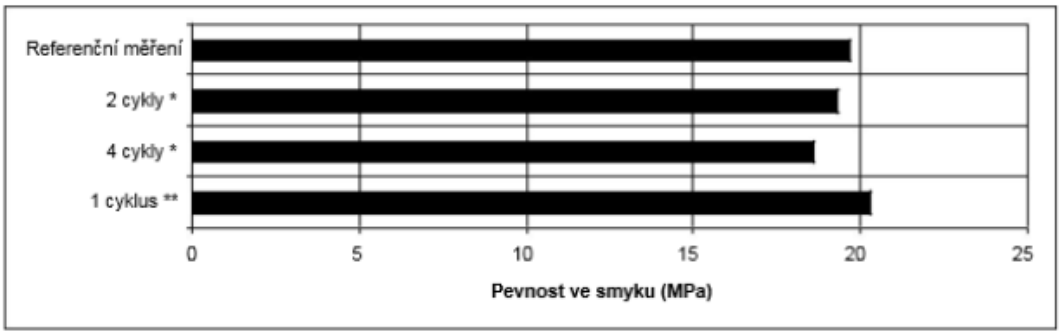
Pevnost ve smyku po x hodinách vystavení teplotě 160°C (tepelná odolnost):

- metoda: ČSN EN 1465
- vytvrzení: 24 hodin/23°C + 1 hodina/80°C
- materiál: hliníkový plech o šířce 25 mm a tloušťce 1,6 mm
- testováno při 23°C



Pevnost ve smyku po cyklických zkouškách:

- metoda: ČSN EN 1465
- vytvrzení: 24 hodin/23°C + 1 hodina/80°C
- materiál: hliníkový plech o šířce 25 mm a tloušťce 1,6 mm
- testováno při 23°C
- vlhkost: 100%
- provedení: plechy zabaleny do bavlněných látek namočených ve vodě a do PE fólie



*+70°C/150hod + -20°C/16hod
**+70°C/22 dnů + -30°C/16 dnů

Objednávky: logistika@sptechnology.cz
Administrativa: office@sptechnology.cz
Laboratoř: laborator@sptechnology.cz

IČ: 01980131
DIČ: CZ01980131
Bank connection: 263608261/0300

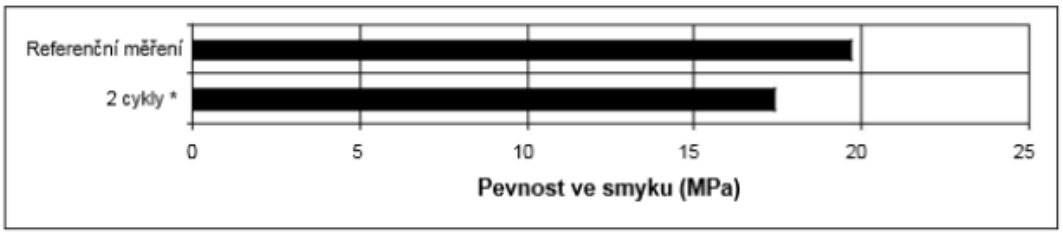
PŘÍLOHA 1 (5/6)

Sourcing Point Technology, s.r.o
Holandská 878/2
639 00 Brno - Štýřice

SOURCING POINT TECHNOLOGY

Pevnost ve smyku po cyklických zkouškách ve slané vodě (odolnost slané vodě):

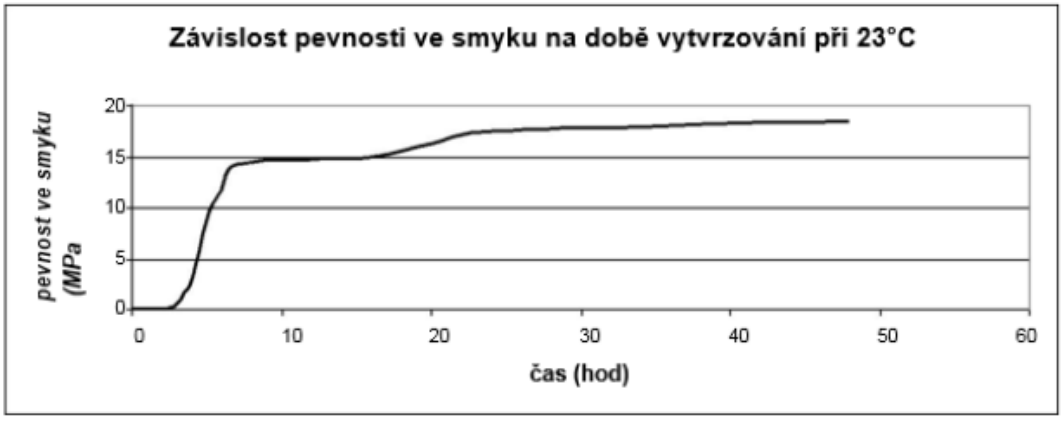
- metoda: ČSN EN 1465
- vytvrzení: 24 hodin/23°C + 1 hodina/80°C
- materiál: hliníkový plech o šířce 25 mm a tloušťce 1,6 mm
- testováno při 23°C
- vlhkost: 100%
- provedení: plechy zabaleny do bavlněných látek namočených v 5% roztoku NaCl a do PE fólie



* +70°C/150hod + -20°C/16hod

Vývin pevnosti ve smyku v čase při dotvrzování:

- metoda: ČSN EN 1465
- vytvrzování: při 23°C
- materiál: hliníkový plech o šířce 25 mm a tloušťce 1,6 mm
- testováno při 23°C



Objednávky: logistika@sptechnology.cz
Administrativa: office@sptechnology.cz
Laboratoř: laborator@sptechnology.cz

IČ: 01980131
DIČ: CZ01980131
Bank connection: 263608261/0300

Sourcing Point Technology, s.r.o
Holandská 878/2
639 00 Brno - Štýřice

SOURCING POINT TECHNOLOGY

Ostatní data

Skladovací teplota:	min. + 10°C, max. + 30°C
Doba skladovatelnosti:	6 měsíců v uzavřené nádobě

Balení

5 a 10 kg nádoby, 20L Hobbock, 180 ml Kartuše

Bezpečnost při práci

viz bezpečnostní list

Objednávky: logistika@sptechnology.cz
Administrativa: office@sptechnology.cz
Laboratoř: laborator@sptechnology.cz

IČ: 01980131
DIČ: CZ01980131
Bank connection: 263608261/0300

PŘÍLOHA 2 (1/3)

MTS Criterion Series 40 Specifications - Comparative

		Model 41	Model 42		Model 43		Model 44	
		C41.103	C42.503	C43.104	C43.304	C43.504	C44.104	C44.304
Maximum Rated Force Capacity	kN	1	5	10	30	50	10	30
	lbf	220	1100	2200	6600	11000	2200	6600
Force Capacity Options	N, kN	1 N, 5 N, 25 N, 50 N, 100 N, 250 N, 500 N, 1 kN	1 N, 5 N, 10 N, 25 N, 50 N, 100 N, 250 N, 500 N, 1 kN, 2 kN, 5 kN	100 N, 250 N, 500 N, 1 kN, 2.5 kN, 5 kN, 10 kN	100 N, 250 N, 500 N, 1 kN, 2.5 kN, 5 kN, 10 kN, 20 kN, 30 kN	100 N, 250 N, 500 N, 1 kN, 2.5 kN, 5 kN, 10 kN, 20 kN, 30 kN, 50 kN	100 N, 250 N, 500 N, 1 kN, 2.5 kN, 5 kN, 10 kN	100 N, 250 N, 500 N, 1 kN, 2.5 kN, 5 kN, 10 kN, 20 kN, 30 kN,
	lbf		0.2, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 110, 220, 450, 1100	20, 50, 110, 220, 500, 1100, 2200	20, 50, 110, 220, 500, 1100, 2200 4400, 6600	20, 50, 110, 220, 500, 1100, 2200 4400, 6600, 11000	20, 50, 110, 220, 500, 1100, 2200	20, 50, 110, 220, 500, 1100, 2200 4400, 6600
Frame Type	Guide Columns Floor-standing/ Table-top	1 Table-top	1 Table-top	2 Table-top	2 Table-top	2 Table-top	2 Floor-standing	2 Floor-standing
Test Zones	Single/Dual	Single	Single	Single	Single	Single	Single or Dual	Single or Dual
Maximum Test Speed	mm/min	3000	2000	2000	1020	750	2000	1020
	in/min	118	78.7	78.7	40.16	30	78.7	40.1
Minimum Test Speed	mm/min	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
	in/min	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Position Resolution	mm	0.00005	0.00005	0.00005	0.00006	0.00006	0.000049	0.00006
	in	0.000002	0.000002	0.000002	0.0000024	0.0000024	0.0000019	0.0000024
Power Requirements	V AC	200 - 230 V AC, 5 Amps, 50 / 60 Hz, 1000 W	200 - 230 V AC, 5 Amps, 50 / 60 Hz, 1000 W	200 - 230 V AC, 10 Amps, 50 / 60 Hz, 2000 W	200 - 230 V AC, 12 Amps, 50 / 60 Hz, 2400 W	200 - 230 V AC, 12 Amps, 50 / 60 Hz, 2400 W	200 - 230 V AC, 10 Amps, 50 / 60 Hz, 2000 W	200 - 230 V AC, 12 Amps, 50 / 60 Hz, 2400 W
	phase		1	1	1	1	1	1
Space Between Columns	mm	100	100*	425	420	420	400	400
	in	3.94	3.94*	16.73	16.54	16.54	15.75	15.75
Vertical Test Space								
Standard Length	mm	1100	820	1200	1200	1200	1190	1190
	in	43.31	32.3	47.2	47.2	47.2	46.9	46.9
Extended Length	mm		1120	1500	1500	1500	1490	1490
	in		44.1	59.1	59.1	59.1	58.7	58.7
Crosshead Travel								
Standard Length	mm	900	650	1000	1000	1000	1000	1000
	in	35.4	25.6	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4
Extended Length	mm		950	1300	1300	1300	1300	1300
	in		37.4	51.2	51.2	51.2	51.2	51.2
Frame Height								
Standard Length	mm	1520	1332	1616	1752	1752	1951	1951
	in	59.84	52.44	63.6	68.97	68.97	76.8	76.8
Extended Length	mm		1632	1916	2052	2052	2251	2251
	in		64.25	75.43	80.78	80.78	88.6	88.6
Frame Width	mm	560	704	794	826	826	861	861
	in	22.05	27.7	31.3	32.5	32.5	33.9	33.9
Frame Depth	mm	530	636	757	768	768	689	689
	in	20.87	25	29.8	30.2	30.2	27.1	27.1
Frame Weight								
Standard Length	kg	60	112	175	305	305	367	395
	lb	132	246	385	671	671	807.4	869
Extended Length	kg		125	190	325	325	383	410
	lb		275	418	715	715	842.6	902

** For single-column load frames this measurement denotes the distance between grip center and column cover*

PŘÍLOHA 2 (2/3)

MTS Criterion Series 40 Specifications - Common

Force Accuracy*	± 0.5% of applied force	± 1.0% of applied force
Force Range**	1 to 100% of rated force capacity	0.5 to 1% of force rated capacity
Rated Force Capacity at Max Test Speed	100%	
Maximum Test Speed at Rated Force Capacity	100%	
Speed Accuracy	Set speed < 0.01mm/min: speed accuracy is within ± 1.0% of set speed Set speed ≥ 0.01mm/min: speed accuracy is within ± 0.5% of set speed	
Position Accuracy	within ± 0.5%	
Strain Accuracy***	± 0.5% of applied strain	
Security Protection	Over-force, travel limits, over-voltage and others	
Over Force Protection	110%	
Data Acquisition Rate	1000 Hz	
Control Loop Rate	1000 Hz	
Environmental Requirements		
Operating Temperature	5 to 40°C 41 to 104°F	
Operating Humidity	5 to 85% Non-condensing	
Storage Temperature	-18 to 49°C 0 to 120°F	
Maximum Storage Humidity	90% Non-condensing	
Maximum Altitude	2000 Meters	
Motor & Drive System	AC Servo Motor	
Ballscrews	Pre-Forced	
Position Measurement	Encoder	
Additional DC Conditioning Channels	2 channels *(Examples: resistive extensometers and force cells)*	
Additional Digital Conditioning Channels	1 channel *(Examples: long travel extensometer and quadrature encoders)*	

** Applicable onsite calibration services are available to meet ISO 7500-1, ASTM E4.*

*** Exceptions apply. See your local MTS contact.*

**** Extensometer calibration services are available to meet ISO 9513, ASTM E83.*

PŘÍLOHA 2 (3/3)

Shipping Information

		Model 41	Model 42		Model 43		Model 44	
		C41.103	C42.503	C43.104	C43.304	C43.504	C44.104	C44.304
Standard Length Frame								
Dimensions - Crated	mm	820 x 1100 x 1760	1200 x 960 x 1570	1036 x 956 x 1865	2040 x 1140 x 1160	2040 x 1140 x 1160	2165 x 1100 x 930	2165 x 1100 x 930
	in	32.28 x 43.31 x 69.29	47.2 x 37.8 x 61.8	40.8 x 37.6 x 73.4	80.31 x 44.88 x 45.67	80.31 x 44.88 x 45.67	85.24 x 43.31 x 36.6	85.24 x 43.31 x 36.6
Weight - Crated	kg	110	247	312	560	560	600	600
	lb	242.5	543.3	686.4	1232	1232	1320	1320
Extended Length Frame								
Dimensions - Crated	mm		1120 x 1070 x 1920	1150 x 1110 x 2200	2340 x 1140 x 1160	2340 x 1140 x 1160	2465 x 1100 x 930	2465 x 1100 x 930
	in		44.1 x 42.1 x 75.59	45.27 x 43.7 x 86.6	92.1 x 44.88 x 45.67	92.1 x 44.88 x 45.67	97.05 x 43.31 x 36.6	97.05 x 43.31 x 36.6
Weight - Crated	kg		326	438	580	580	695	695
	lb		717.2	963.6	1276	1276	1529	1529

		Model 45				
		C45.504	C45.504 Wide	C45.105	C45.305	C45.605
Standard Length Frame						
Dimensions - Crated	mm	2620 x 1620 x 1600	2960 x 2000 x 1410	2620 x 1620 x 1600		3680 x 1960 x 1760
	in	103.15 x 63.78 x 62.99	116.5 x 78.74 x 55.5	103.15 x 63.78 x 62.99	114.96 x 65.35 x 65.35	144.89 x 77.17 x 69.29
Weight - Crated	kg	1880	2150	1880	2010	4050
	lb	4136	4739	4236	4422	8928
Extended Length Frame						
Dimensions - Crated	mm	2920 x 1620 x 1600		2920 x 1620 x 1600	3220 x 1660 x 1660	
	in	114.96 x 63.78 x 62.99		114.96 x 63.78 x 62.99	126.77 x 65.35 x 65.35	
Weight - Crated	kg	1980		1980	2210	
	lb	4356		4356	4862	