



Friction Stir Welding European Qualifications

CU11 – Zavádzanie FSW systému

FSW inžinier



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

11. Definícia spoja

11.1 Náklady

11.2 Požiadavky na inštaláciu FSW systému

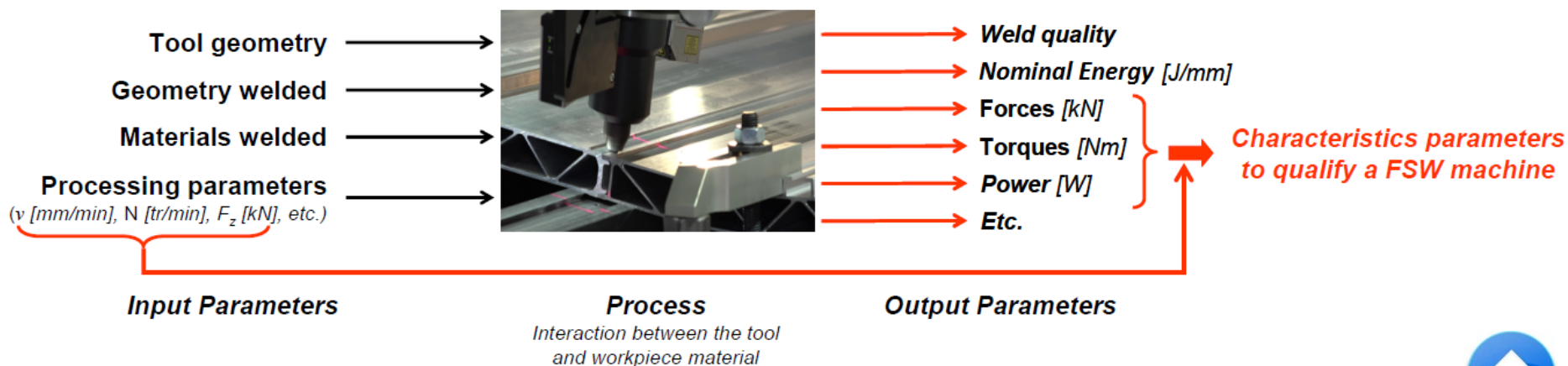
11.3 Operácie dodatočného spracovania

11.2 Literatúra

11.1 FSW zariadenie

V literatúre sa uvádzajú 3 typy strojov vhodných na vykonávanie FSW metódy. Sú to nasledovné stroje:

- [Konvenčné obrábacie stroje](#) ako sú napríklad frézky;
- [Špeciálne FSW stroje](#) alebo stroje vyrobené na zákazku;
- [Priemyselné roboty](#).



Presentation of the input and parameters related to a FSW operation



11.1.1 Konvenčné FSW stroje

- FSW proces je podobný, čo sa týka pracovného princípu zariadenia, ako ostatné výrobné procesy ako napríklad odstraňovanie otrepov, brúsenie alebo vrtanie. Preto nejaký **konvenčný obrábací stroj**, ako je frézka možno použiť aj na zváranie tenkých hliníkových dielcov FSW metódou.
- **Zaťaženia vyžadované pri FSW sú ale vyššie ako zaťaženia vytvárané pri procese frézovania.**
- Z tohto dôvodu sa musí konvenčný obrábací stroj spevniť, aby sa tak zvýšila jeho **kapacita zaťaženia a tuhosť**



11.1.2 Špeciálne FSW stroje

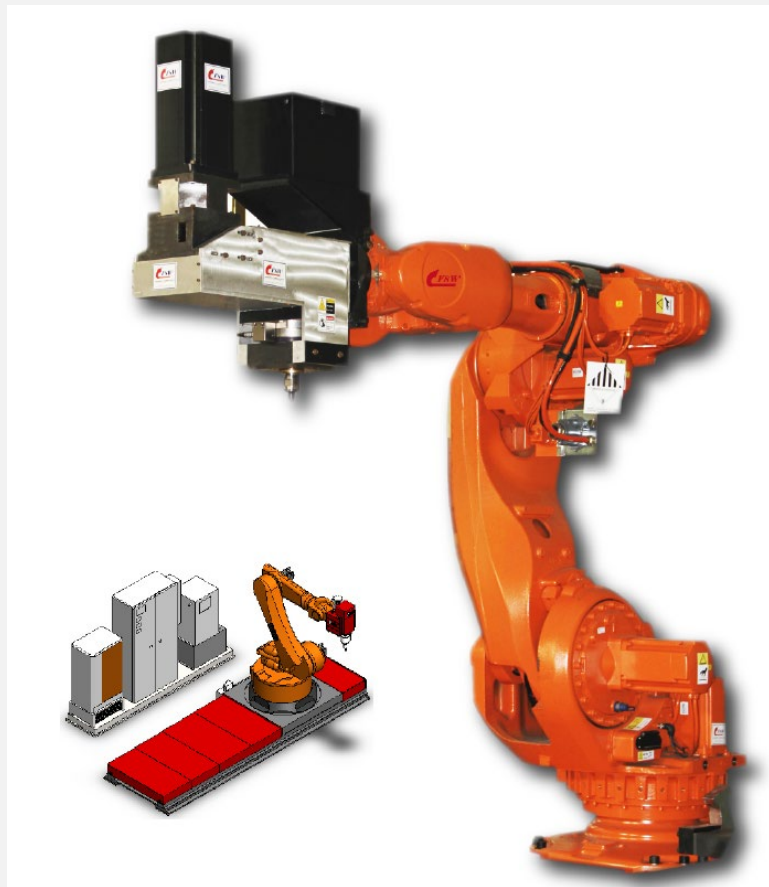
- Špeciálne FSW stroje obvykle disponujú **najvyššou kapacitou zaťaženia, tuhosťou, presnosťou** a použiteľnosťou [23].
- Špeciálne FSW stroje sú obvykle pomerne drahé a **ich cena sa zvyšuje s kapacitou ich flexibility (pružnosti)**.
- Použitie špeciálnych FSW strojov sa odporúča pri veľkosériovej výrobe zvarov hrubých dielcov, pri aplikáciách kde:
 - sa požaduje vysoká tuhosť;
 - pri jedno a viacosových aplikáciách;
 - sa jedná o dlhé dráhy zvaru.



Špeciálne FSW stroje



11.1.3 Priemyselné roboty



FSW zariadenie a riadiace systémy [12]

Classification

General Robotic FSW System

Robotic FSSW System

Robotic Bobbin FSW System

Robotic Floating Bobbin FSW System

Robotic Stationary Shoulder FSW System

- Higher automatic welding processing
- More complex structure, e.g. 2D, 3D
- Multi-control models, e.g. pressure, position and torsion controlling model
- Higher quality with lower deformation joint
- More stability



Robotic FSW system with two welding stations for simultaneous welding and loading/unloading of components



- | | |
|-----------------------------------|--|
| A) HMI / process & system control | D) Welding station 2 |
| B) FSW welding head with FSW tool | E) Industrial robot |
| C) Welding station 1 | F) Safety housing with automatic roller shutters |

Welding parameters FSW robot system

Welding speed	up to 2,000 mm/min
Welding depth	up to 10 mm
Process forces axial	up to 10 kN
Process forces radial	up to 5 kN
Spindle rotation	up to 10,000 min ⁻¹

Riešenia na báze robotov sú dostupné v dvoch základných kategóriách [23]:

- Roboty s kĺbovým ramenom
- Paralelne-kinematické roboty

Roboty s kĺbovým ramenom zabezpečujú **vyšokú reprodukovateľnosť** a **flexibilitu** ale majú **malú presnosť**, ktorá sa zhoršuje ak sú vystavené vysokým zaťaženiám.

Pri porovnaní kĺbových robotov s modernými FSW strojmi tieto roboty vykazujú **vyššiu flexibilitu** a **rozhodovacu schopnosť**, okrem skutočnosti že sú aj podstatne menej nákladné. Avšak tento typ robotov má pomerne **nízku tuhosť** a **pomerne nízku kapacitu zaťaženia** čo obmedzuje ich aplikáciu.

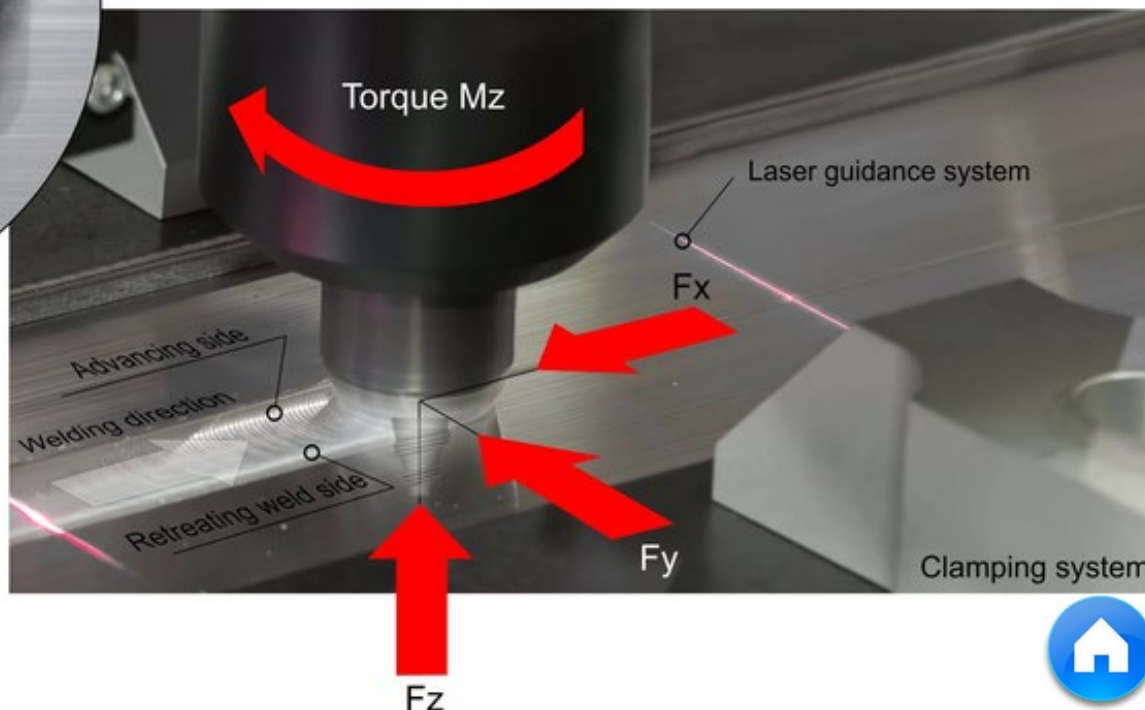
11.1.4 Silová kapacita zariadení



Hlavnou výzvou pri FSW systéme je mať zariadenie schopné **podporovať vysoké zaťaženia** generované počas zváracieho procesu, ktoré závisia najmä na **type materiálu** ako aj na **hrúbke obrobkov**.

Najrelevantnejšie zaťaženia pôsobiace na FSW stroj:

1. Osová sila (F_z),
2. Pričná sila (F_x),
3. Postranná sila (F_y),
4. Krútiaci moment (M_z).



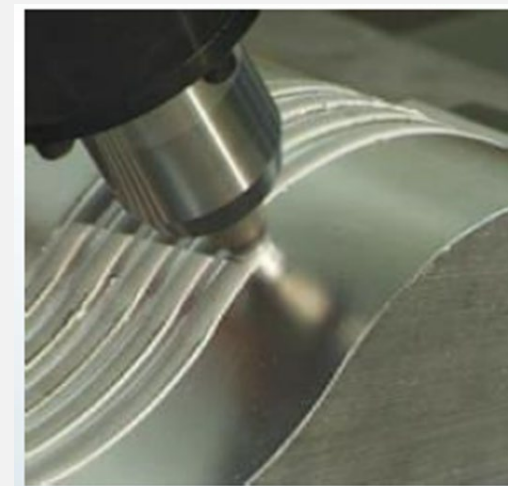
Silová kapacita

Osová sila (F_z)	Postranná sila (F_y)	Priečna sila (F_x)	Krútiaci moment (M_z)
<p>Osová sila je jedným z hlavných parametrov procesu. Táto zabezpečuje trenie medzi FSW nástrojom a obrobkom ako aj tvárniaci prítlak potrebný na dosiahnutie dobrého formovania zvaru. Teplo vytvárané pri FSW procese priamo závisí od osovej sily.</p>	<p>Postranná sila (radiálna sila) je dôsledkom asymetrie FSW síl spôsobenej otáčaním nástroja.</p> <p>Postupová strana je mäkšia a teda menej odolná. Táto sila je smerovaná od ústupovej strany smerom k postupovej strane zvaru.</p>	<p>Priečna sila je vytváraná odporom materiálu proti otáčaniu nástroja pozdĺž línie spoja (pôsobí opačne voči smeru zvarovania).</p>	<p>Krútiaci moment udržiava treciu silu medzi FSW nástrojom a obrobkom zabezpečujúcu premiešanie materiálu a formovanie zvarovej húsenice.</p>



11.1.5 Riadiaci systém

- Všetky stroje sú riadené s použitím najnovšej **PLC** technológie (**Programmer Logic Controller – riadenie programovou logikou**) a vysokopresných pohonov. Toto umožňuje jemné a presné riadenie polohových osí a rýchlosti stroja.
- Riadenie v rámci osi Z je riešené buď v režime riadenia polohy alebo nastavenej sily.
- Cez menu ovládaná dotyková obrazovka HMI rozhrania je navrhnutá špeciálne pre FSW metódu. Je to rozhranie pre nastavovanie parametrov procesu, dráhy zvárania ako aj najbežnejších parametrov stroja. Poskytuje tiež možnosť monitorovania parametrov procesu, alarmov a statusu procesu.

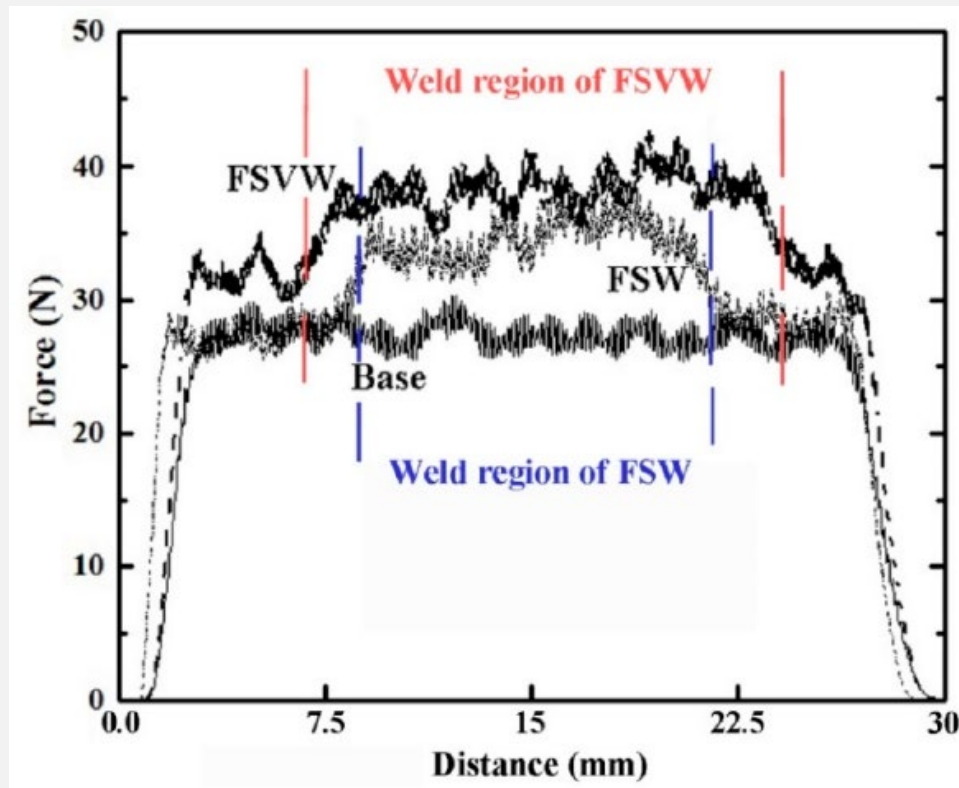
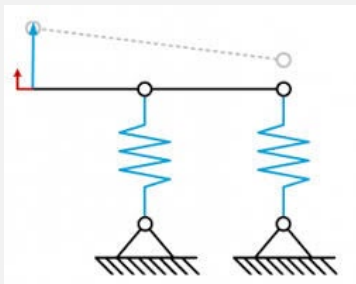


11.1.6 Charakteristiky tuhosti a presnosti

Toto je schopnosť FSW zariadenia znášať zaťaženia **bez následnej deformácie alebo priehybov**.

Ak sa FSW stroj vyznačuje **nízkou tuhosťou** jeho FSW nástroj sa odchyľuje od požadovanej dráhy zvarovania, **čo výrazne ovplyvňuje kvalitu zvaru**.

Okrem toho stroje s nízkou tuhosťou spôsobujú **nadmerné vibrácie**, čo môže viesť k nestabilite FSW procesu.



11.1.7 Kapacita snímania

- **Snímanie** spočíva v **schopnosti stroja** uvedomovať si niektoré **jav**y, ktoré súvisia so **spojom**, napr. hodnoty **priamych** a **nepriamych premenných zvárania** zapojených do FSW procesu, ktoré odrážajú evolúciu zváraného materiálu a následné formovanie zvaru.
- **Priame premenné zvárania** sú tie parametre, ktoré možno aktivovať priamo (rotačná a posuvná rýchlosť ako aj priečna rýchlosť, uhol naklonenia a externý tepený príkon)
- **Nepriame premenné** sú tie premenné, ktoré nemožno aktivovať priamo, pretože závisia na iných premenných. Do tejto skupiny premenných patria zaťaženia vytvárané zváracím procesom (osová sila, priečna sila, postranná sila a krútiaci moment), teplota dosahovaná v oblasti zvárania, prúdenie premiešaného materiálu a zmiešanie (zmes) premiešaného materiálu.

11.1.8 Rozhodovacia schopnosť

Do riadiaceho systému zariadenia možno zavádzať také metódy riadenia, ktoré **umožňujú samo-adaptáciu procesu**.

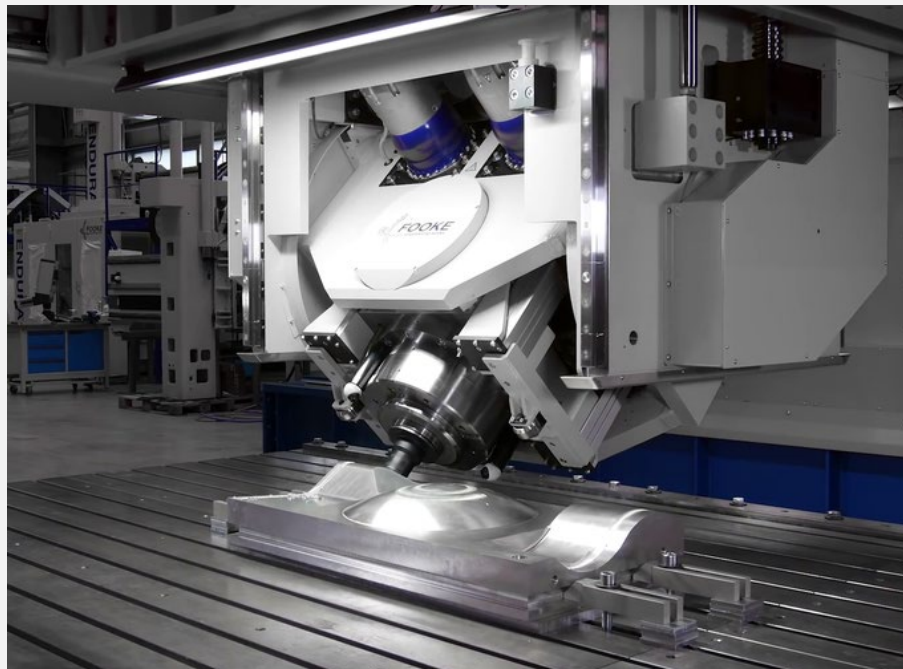
Údaje poskytované zo snímačov (hodnoty priamych a nepriamych premenných) sa používajú ako **spätná väzba systému riadenia**.

DECISION MAKING



11.1.9 Kapacita flexibility (pružnosti)

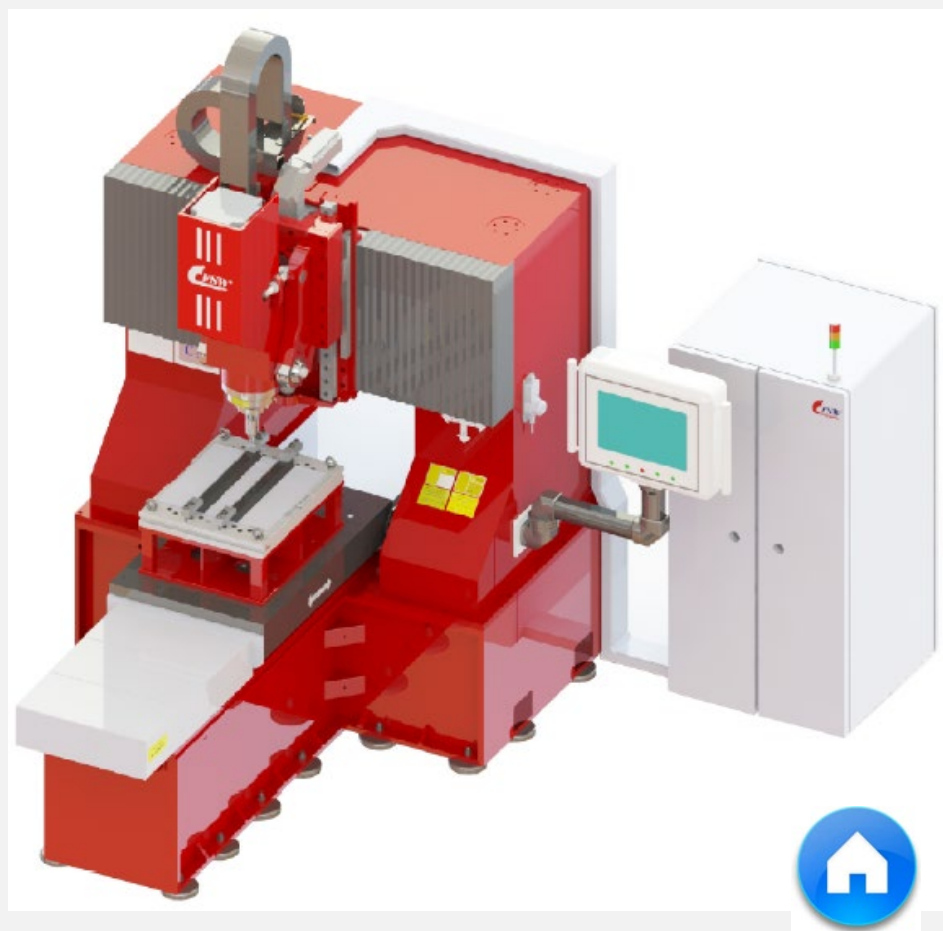
- Flexibilita stroja limituje zložitost dráhy zvarania (lineárna, zakrivená) ktorú možno vykonávať.
- Počet osí (stupňov slobody - DOF), ktorými disponuje stroj obvykle stanovuje aj flexibilitu stroja.



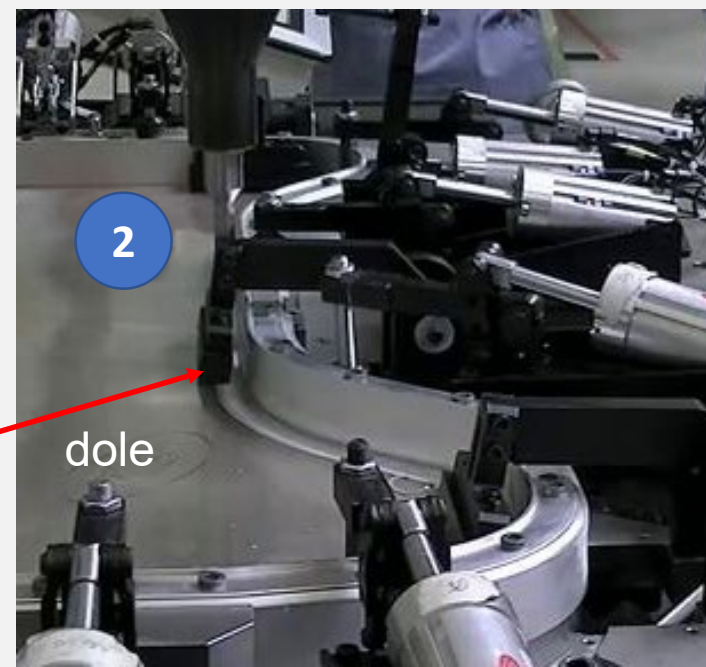
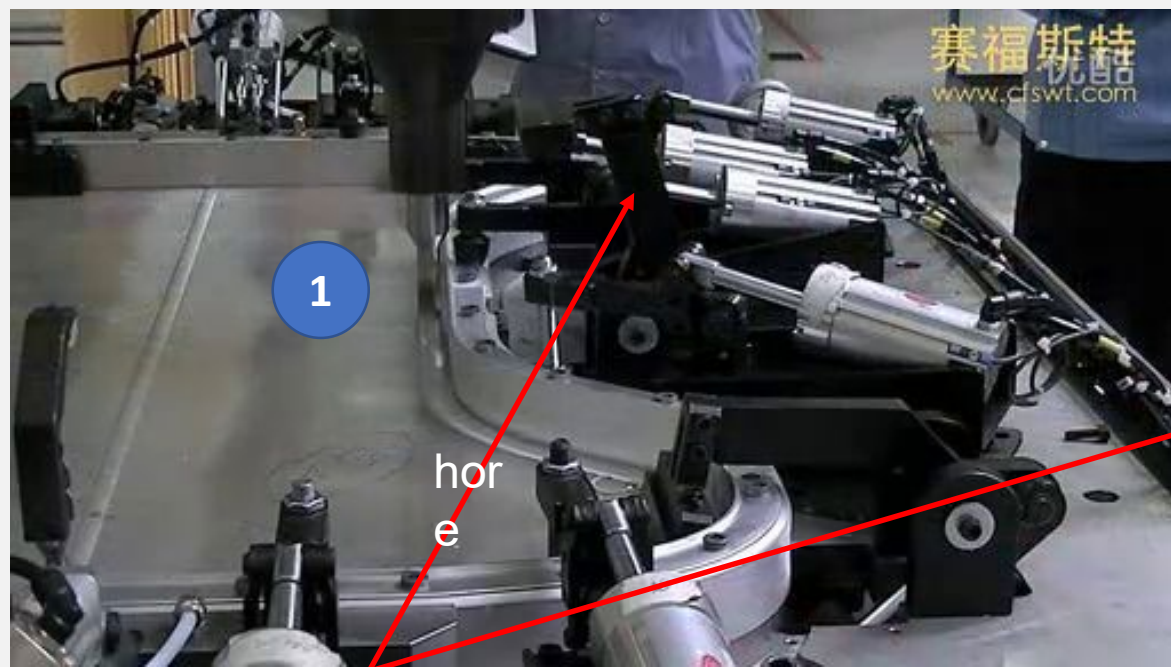
- Trojrozmerná (3D) dráha zvarania je najnáročnejšia na flexibilitu. **Stroj na vykonávanie najjednoduchšej 3D dráhy musí mať minimálne päť osí pohybu.** Mnohé aplikácie vyžadujú viacero zvarov v rôznych smeroch, z čoho vychádza požadovaná flexibilita stroja.

11.2 Súčasti zariadenia

- Tuhý rám
- Silné a rýchle pohybové komponenty
- Moderný systém riadenia nástroja (CNC)
- 5 osí pre 3D dráhu zvárania
- Systém riadenia polohy a sily
- Systém pre záznam a monitorovanie zváracích parametrov
- FSW hlavy s cievkovou technológiou na zváranie hrubších súčastí
- Laserové snímanie sledovania šva
- Video systém monitorovania



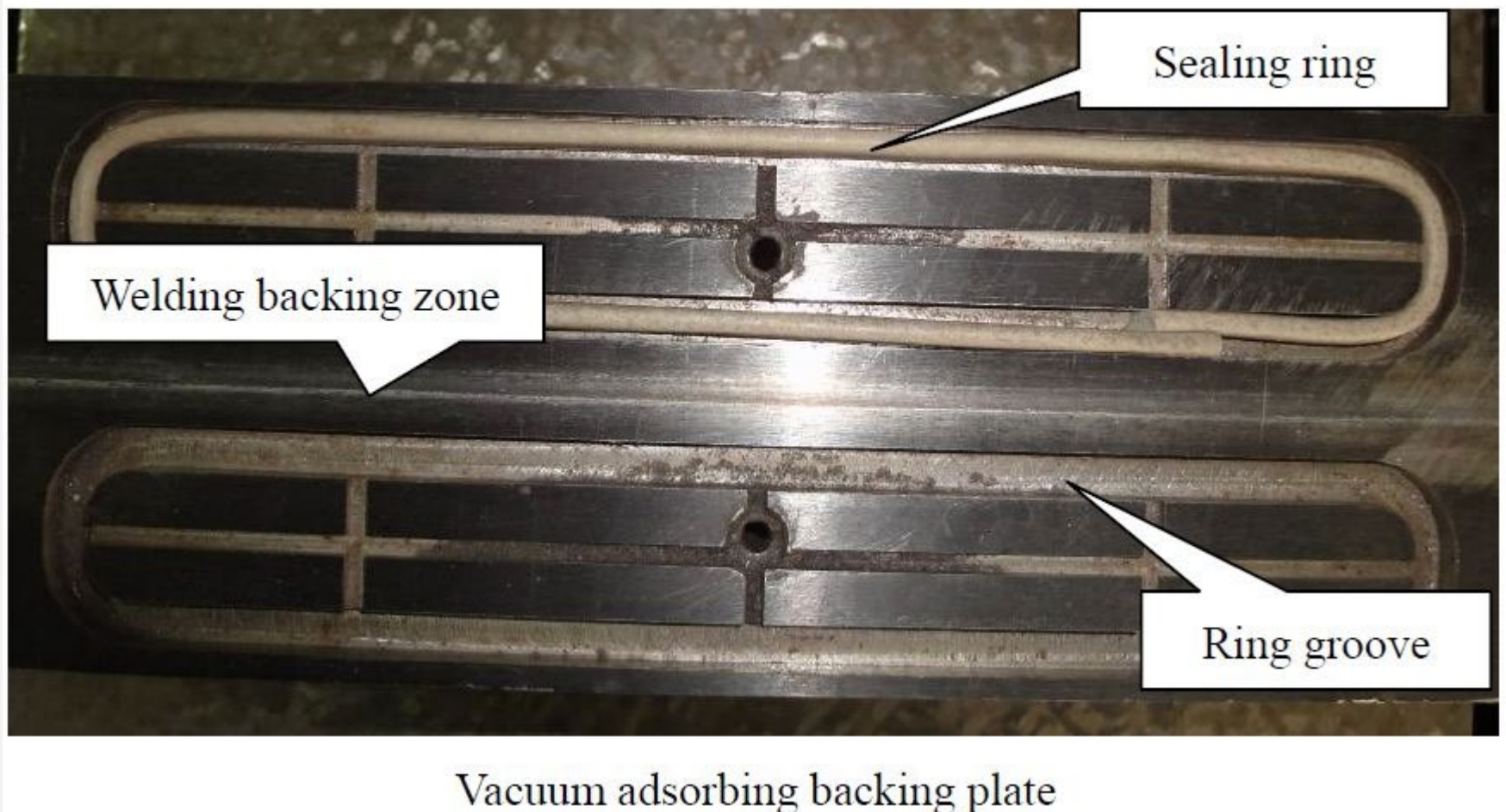
11.2 Upínací systém



Moderné **upínacie systémy** možno riadiť individuálne podľa polohy nástroja. Upínacie pätky sa zdvíhajú a spúšťajú automaticky na základe polohy FSW nástroja. To možno dosiahnuť snímačmi priblíženia alebo kódovým programom.

Pneumatické ovládanie upínacieho systému zložené z viacerých pätek ktoré zabezpečujú dostatočné fixovanie dielcov.

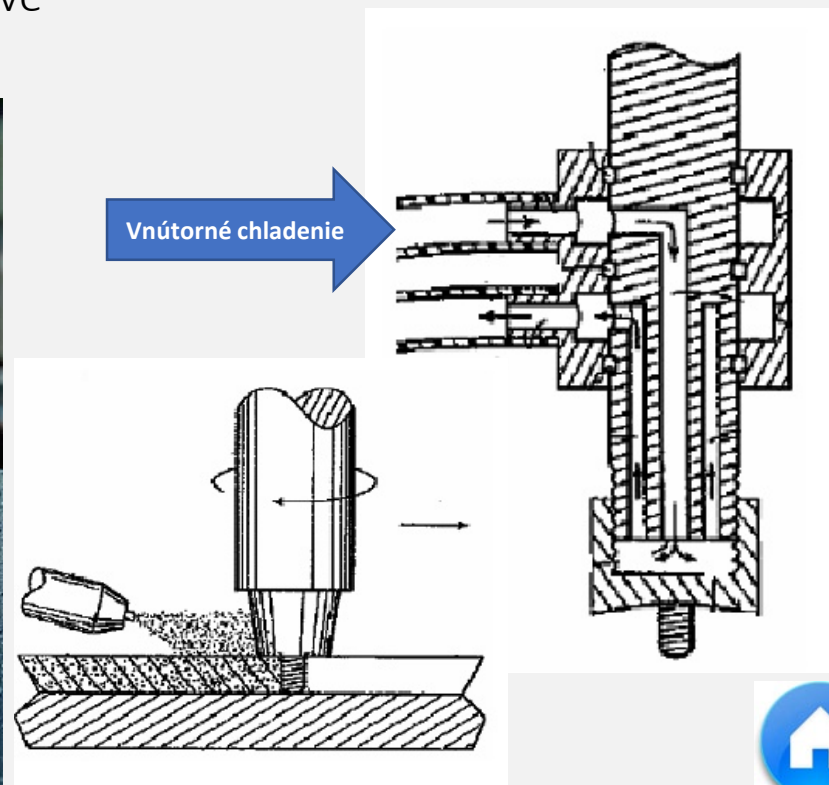
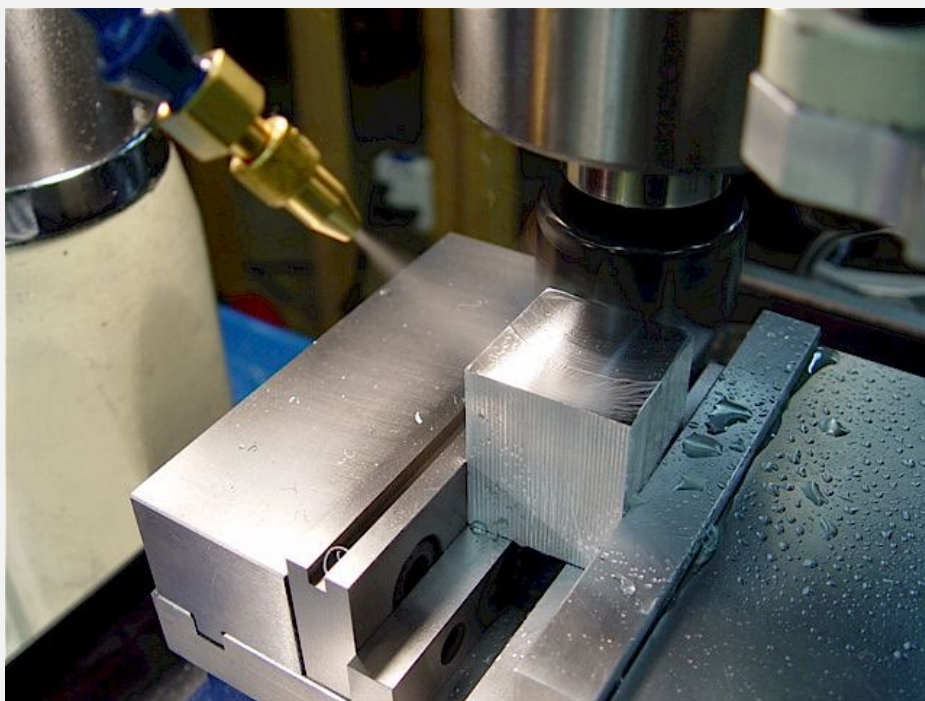
11.2 Upínací systém



11.4 Chladiaci systém

- prietok chladiva 0,01 Gpm pri priamom chladení
- prietok chladiva 0,1 Gpm pri vnútornom chladení
- chladný vzduch alebo plyn sa strieka na zvarové švy

Gpm – galón za minútu
1 Gpm = 3,78 litrov za minútu



11.4 Laserový systém navádzania



11.5 Výrobné náklady

Čo sa týka nákladov, tento problém závisí na **veľkosti FSW stroja**, pokiaľ uvažujeme o malom robote s malým stolom, na ktorom sa budú vyrábať vzorky, tak cena sa bude pohybovať okolo 100000 Eur a ak sa jedná o veľké zariadenia tak ich cena môže dosahovať až 3-4 milióny Eur.

Pri voľbe stroja pre FSW metódu je potrebné zvážiť:

- veľkosť obrobku,
- objem výroby,
- sily súvisiace s FSW procesom,
- tuhosť systému,
- požadovanú presnosť,
- snímaciu kapacitu,
- rozhodovaciu schopnosť,
- požadovanú pružnosť.

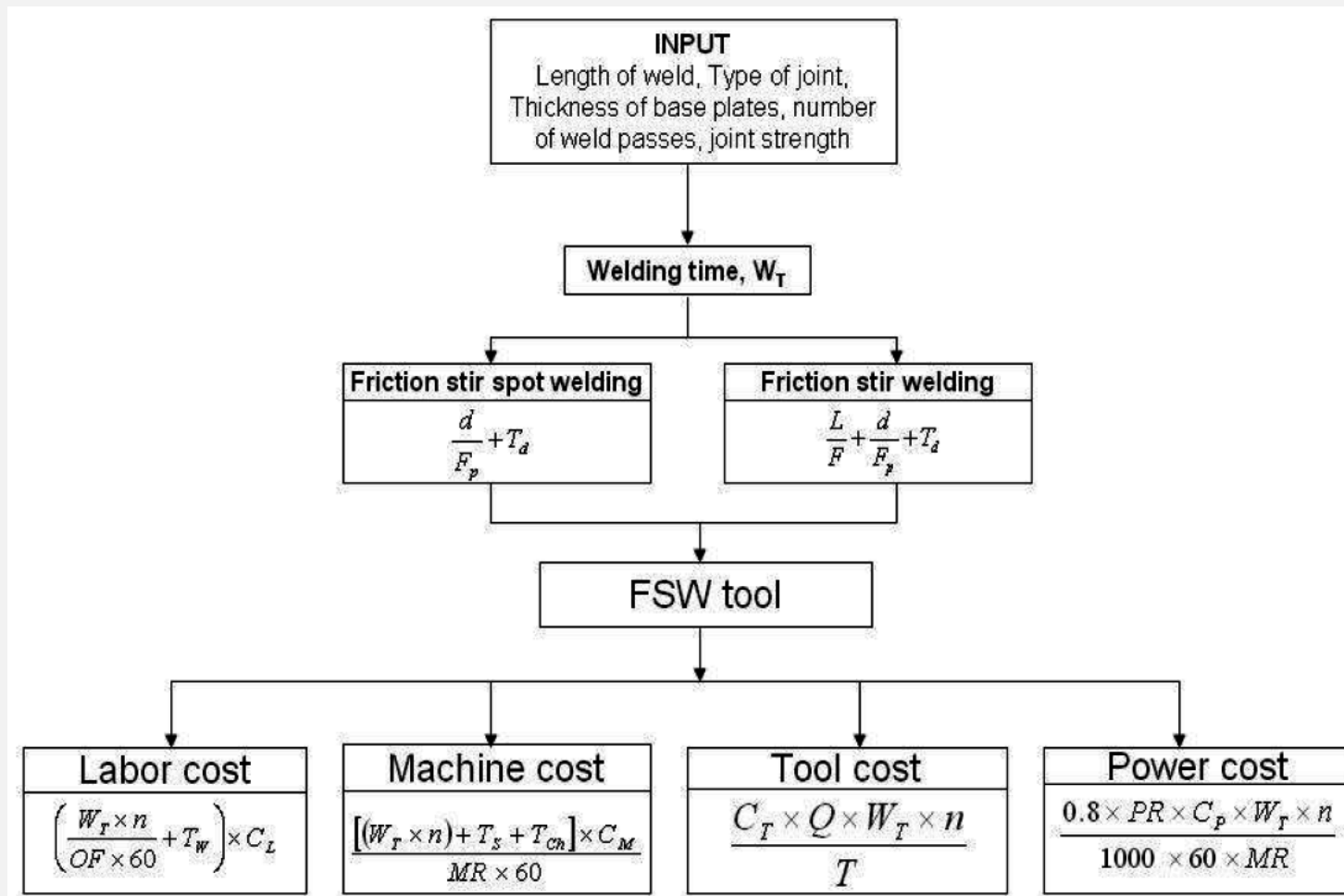
Avšak **zavedenie FSW do výroby**, nie je ani jednoduchým ani bezrizikovým zámerom. Úspešné zavedenie tejto rýchle sa vyvíjajúcej metódy vyžaduje:

- rozsiahlu expertízu procesu,
- **zvážený rozvojový plán**,
- **spoľahlivé**, technicky pokrokové zariadenie.

Pozorne treba zvážiť aj také faktory ako **rozpočtové limity, časové obmedzenia** ako aj vašu úroveň organizácie **expertízy FSW procesu**.

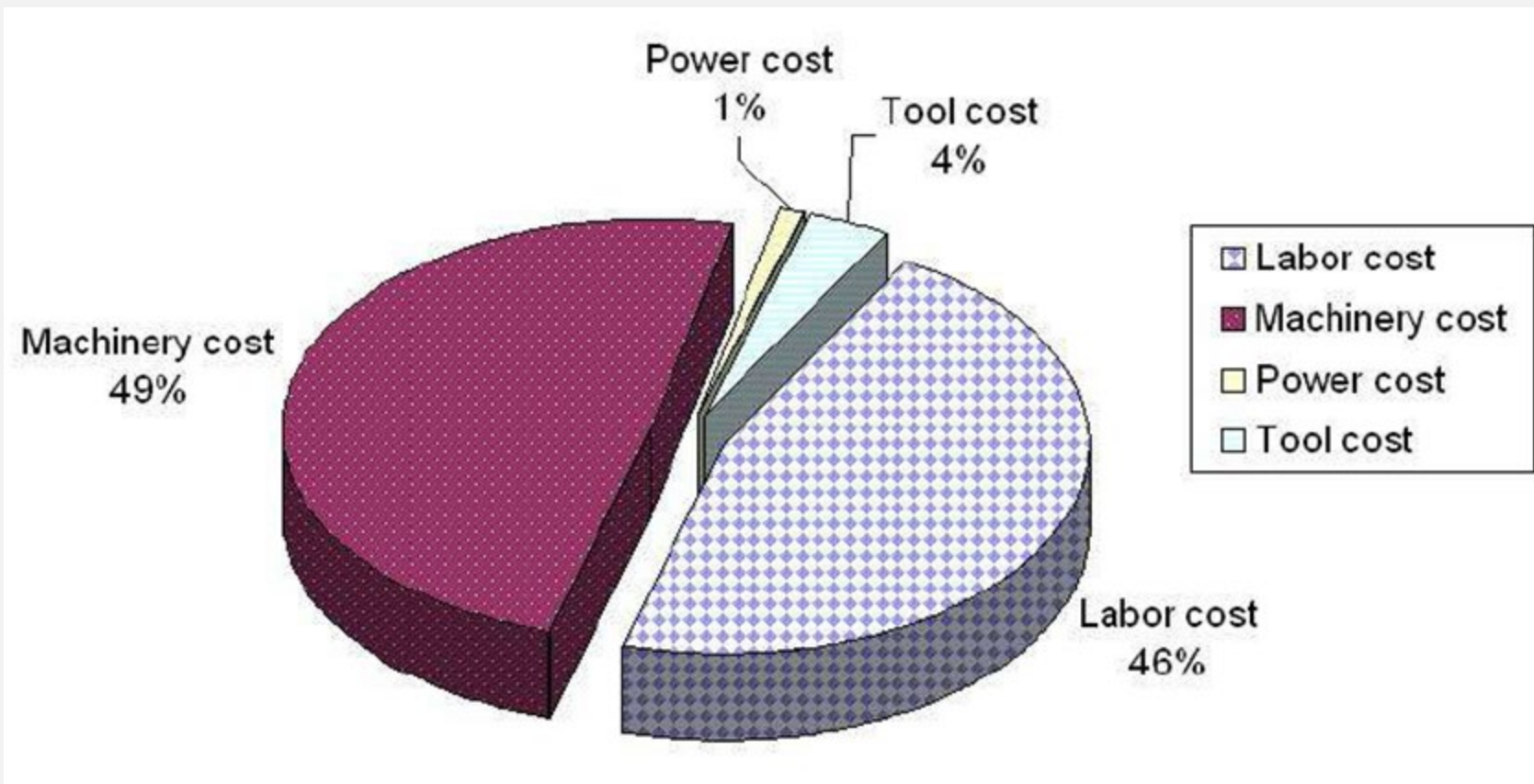


11.5 Výrobné náklady



Tok a rôzne náklady modelu nákladov pre FSW metódu [15]





Rozloženie zložiek nákladov na FSW metódu [15].



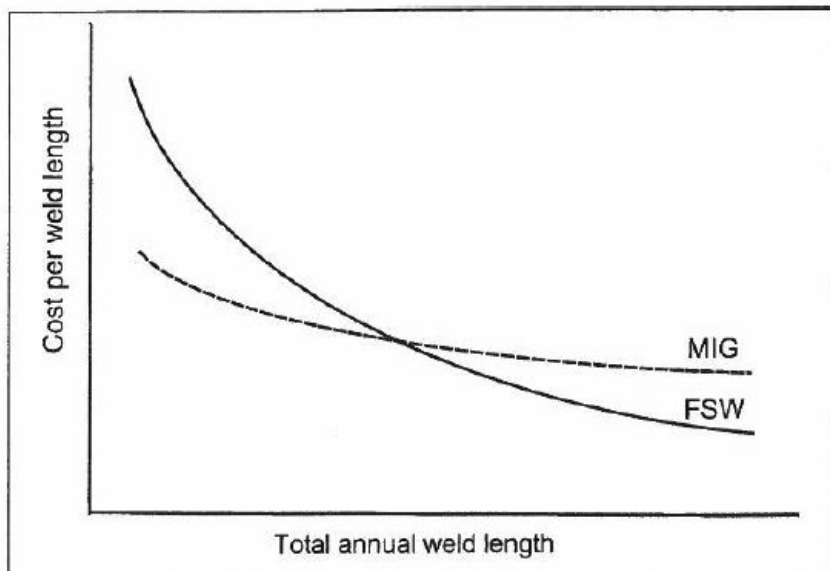


Fig. 3. Schematic representation of FSW and MIG welding costs per length vs. total annual production.

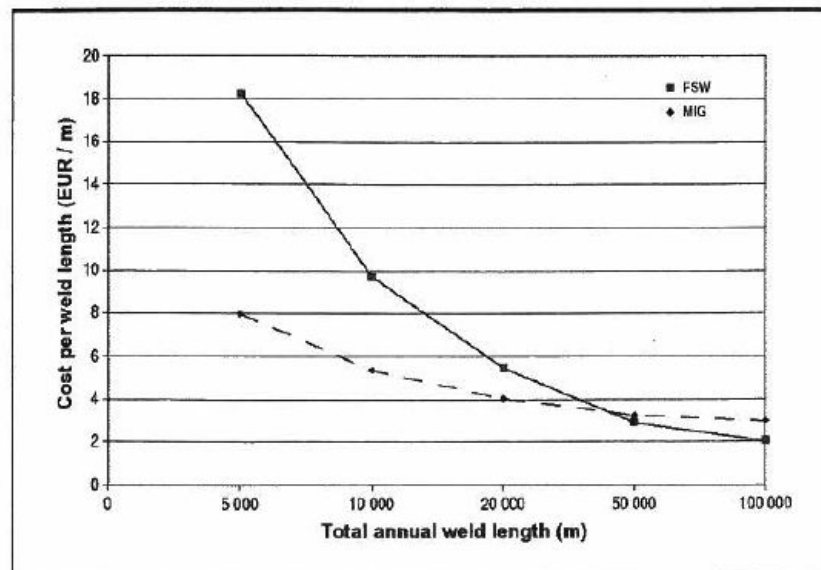
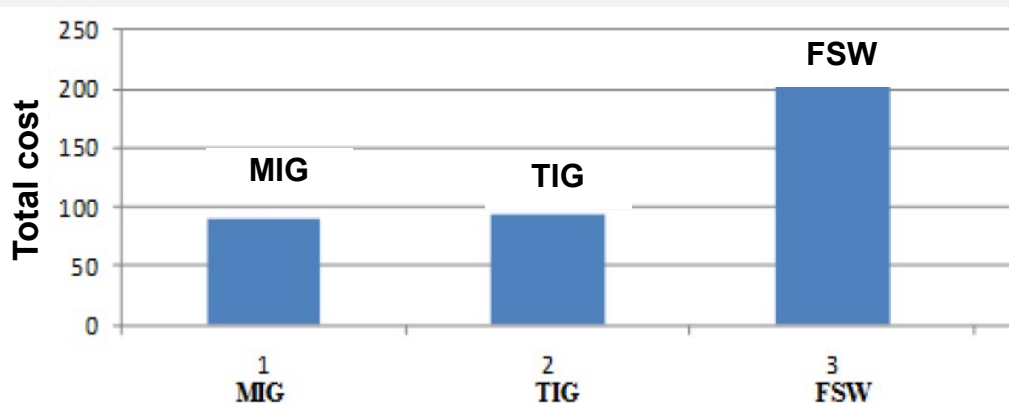


Fig. 4. FSW and MIG welding costs for different annual production amounts. Other parameters as in Table 4.

[10] Porovnanie nákladov pri hliníkových paneloch zvarených FSW a MIG metódou

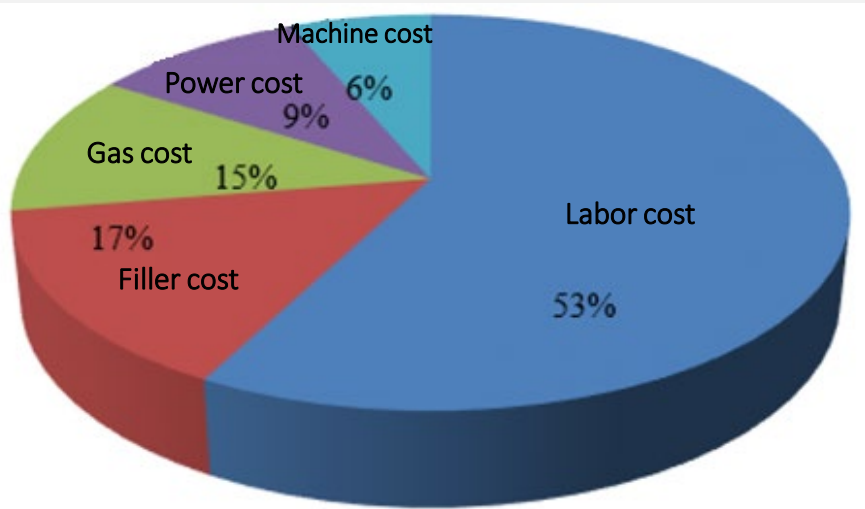
FSW vs. MIG – náklady metódy [10]



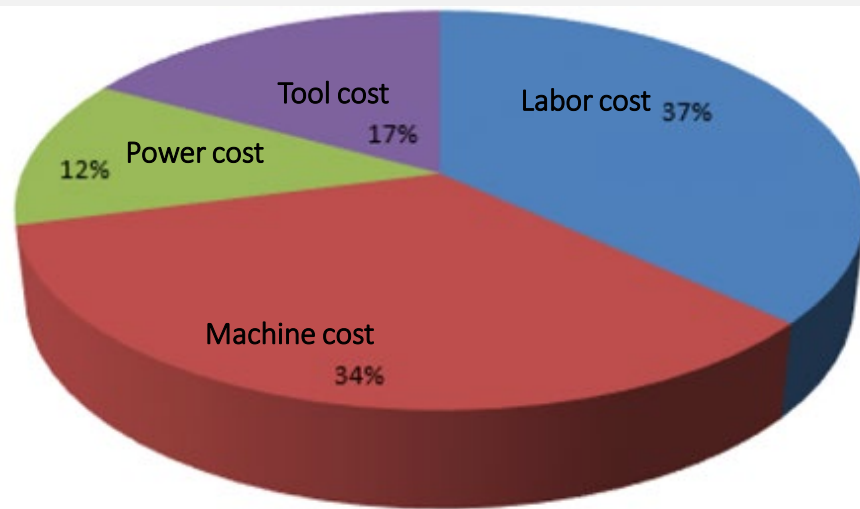


[16] Porovnanie medzi FSW, MIG a TIG metódou založené na odhade celkových nákladov pri zváraní hliníkových rúr

Vzťah medzi celkovými nákladmi a typom zvaru (FSW, MIG a TIG)



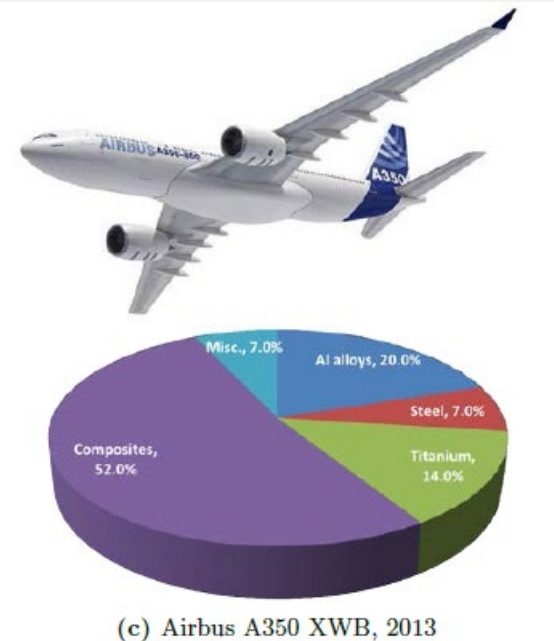
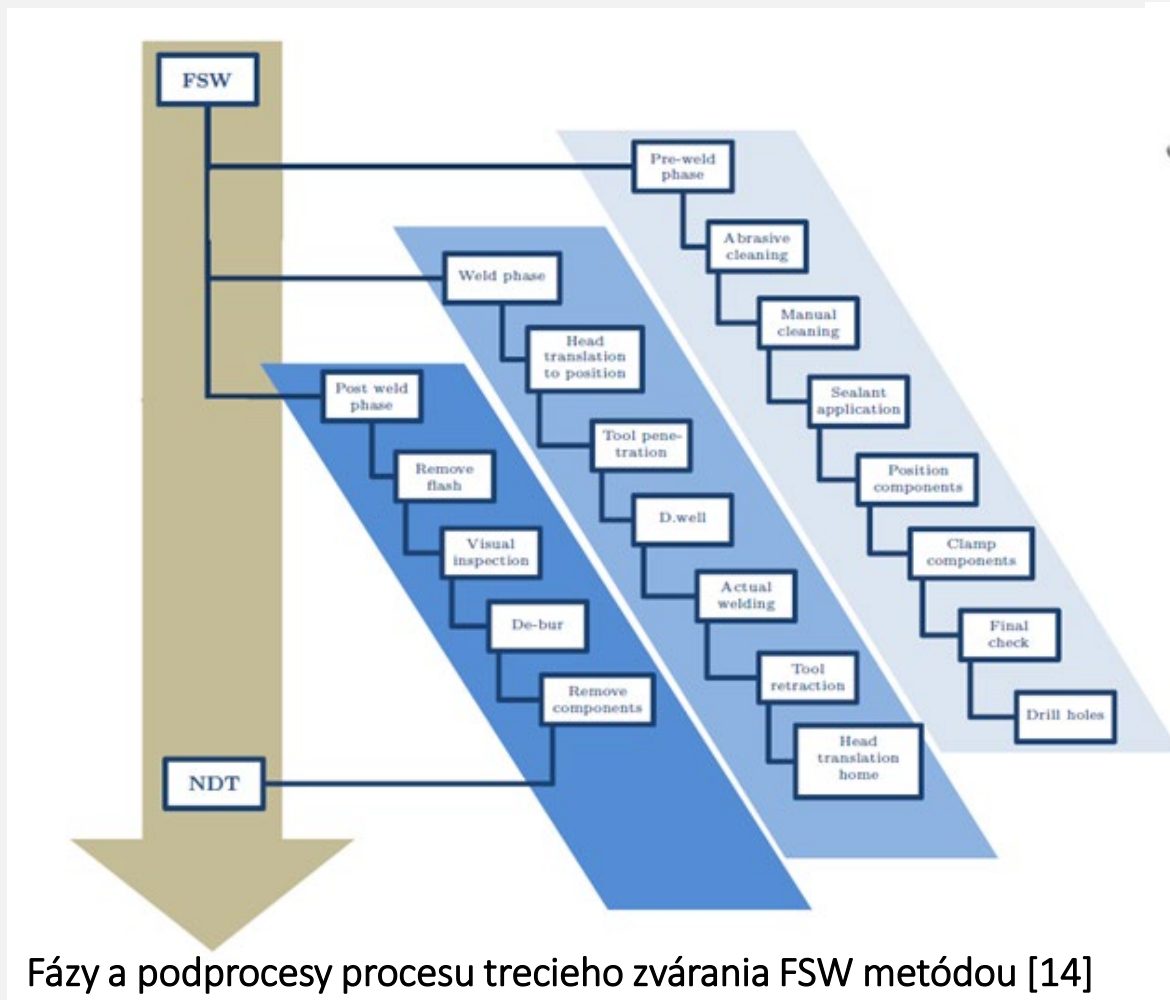
Rozloženie nákladov na zvar vyhotovený MIG a TIG metódou



Rozloženie nákladov na zvar vyhotovený pomocou FSW metódy

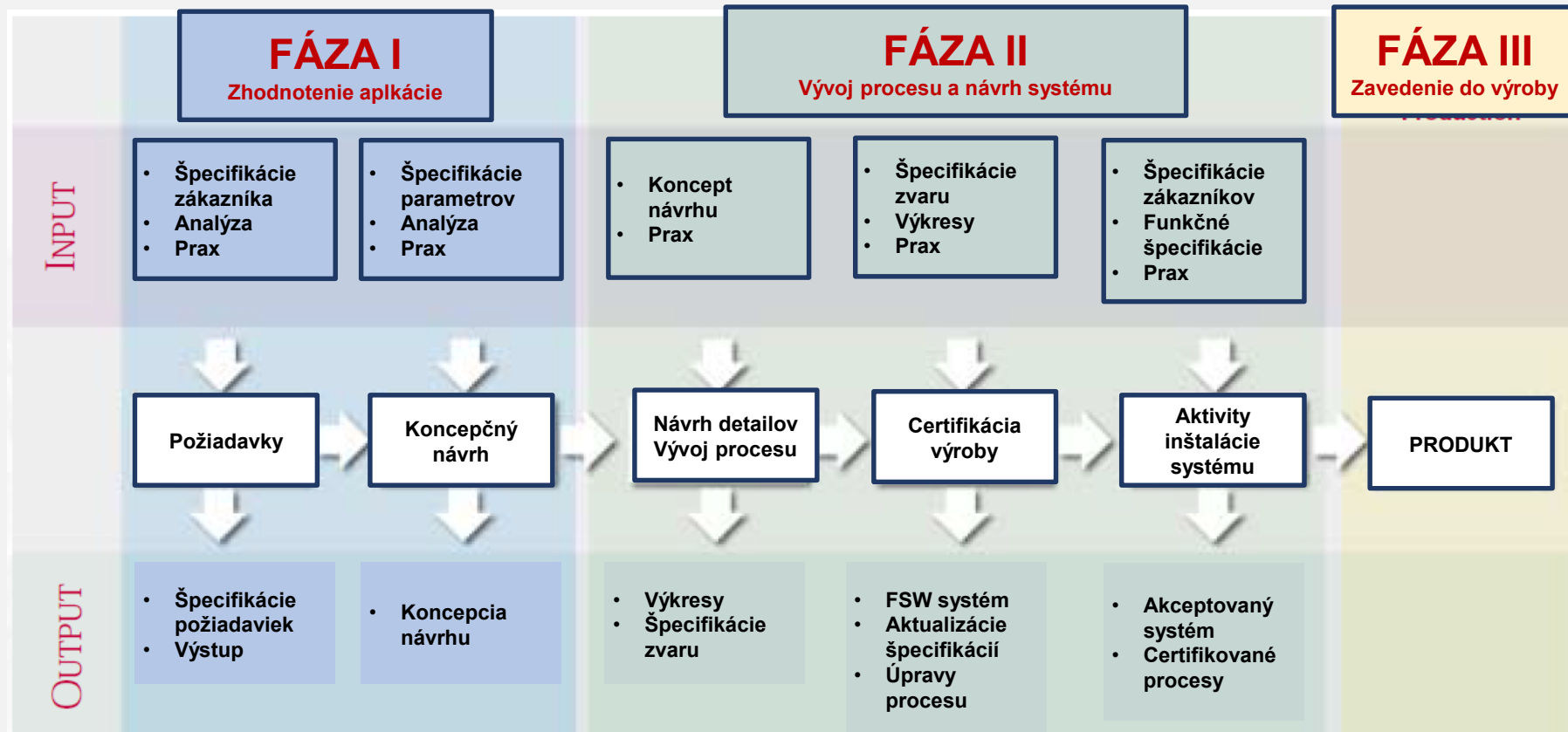
MIG a TIG vs FSW – Náklady metódy [16]

11.6 Požiadavky na inštaláciu FSW systému



[14] Návrh a moderná výroba leteckých konštrukcií použitím FSW metódy





Zavádzanie FSW metódy do výroby [18]

[18] Postupový trojfázový program na maximálne efektívne a nenákladné zavádzanie FSW metódy do výroby.

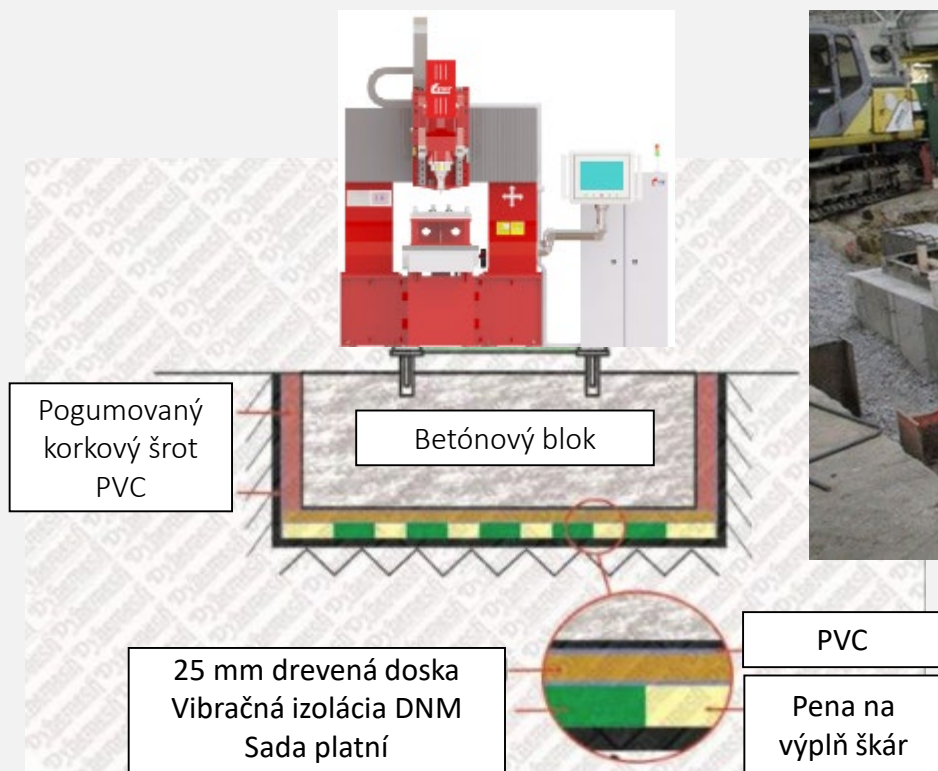
11.6 Požiadavky na inštaláciu FSW systému

Na zníženie **aktívnych** ako aj **pasívnych vibrácií** sa vyžadujú SAMOSTATNÉ ZÁKLADY alebo montáž s potlačením vibrácií, aby sa tak eliminoval prenos pracovných vibrácií a nárazov.

Kvôli zníženiu prenosu vibrácií a nárazov na susediace presné zariadenia alebo stavby sa vyžaduje **montáž s potlačením vibrácií** používaná pre vysokodynamické stroje ako sú FSW stroje, mechanické lisy, buchary, kompresory, zariadenia na skúšanie motorov a pod. Zvládanie zdroja rušivých vibrácií použitím pružného izolačného materiálu je známe ako **AKTÍVNE IZOLOVANIE VIBRÁCIÍ**.

Ak nie je možné predísť alebo podstatne znížiť prenos nárazov a vibrácií zo zdroja na citlivé zariadenia ako je CNC zariadenie, meracie a riadiace systémy alebo laserový navádzací systém tak na **PASÍVNE IZOLOVANIE VIBRÁCIÍ** možno použiť izolačný základový blok s pružným podkladom.

IZOLOVANÝ ZÁKLAD znižuje ťažisko systému základov stroja a **pridáva na stabilite stroja**. Stroj zostáva vyrovnaný počas dynamických zmien zaťaženia a rýchlych pohybov v rámci stroja.



Presné vyváženie zabezpečuje správnu geometriu osí stroja a je nutné aj pre vypúšťanie chladiva a oleja.

Príklad bloku základov alebo montáže s izolovaním vibrácií pre vysokodynamické stroje



11.8 Kontrola kvality

Skúšanie

Podľa normy DIN EN ISO 25239-5, povrchové chyby možno zistiť **vizuálnou kontrolou** (makroskopická skúška), s výnimkou **nedostatočného prievaru zvarov**. Ostatné skúšky pre vyhodnotenie kvality zvarov sú:

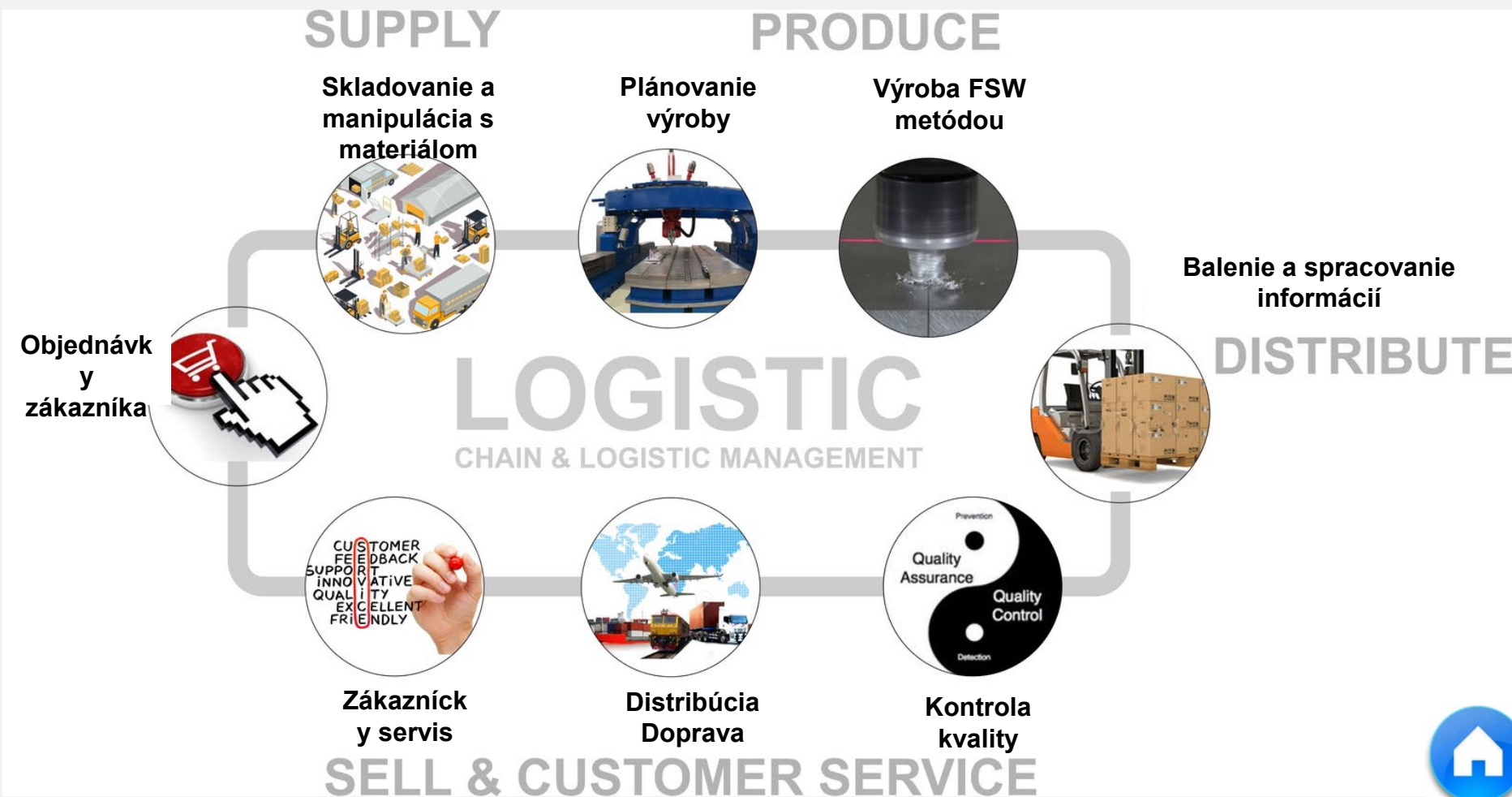
- ✓ Ťahová skúška
- ✓ Ohybová skúška
- ✓ Meranie tvrdosti
- ✓ Metalografické skúmanie
- ✓ NDT kontrola



Norma DIN EN ISO 25239-4, 100 % vizuálna kontrola hotových trecích zvarov, je povinná pre kvalifikáciu zváracieho procesu pri trecom zváraní s premiešaním hliníka.



11.9 Logistika



11.9 Logistika

6 správnych slov logistiky

SPRÁVNÝ tovar

v SPRÁVNOM množstve

dodaný v SPRÁVNOM

stave...

Na SPRÁVNE miesto

v SPRÁVNOM čase

za SPRÁVNU cenu

Tieto očakávania zákazníka definujú účel systému logistiky – to zabezpečuje, že správny tovar, v správnom množstve a v správnom stave je dodávaný na správne miesto v správnom čase a za správnu cenu. V logistike sa to volá 6 správnych slov.



11.10 Inžinierske siete (elektrina, stlačený vzduch)

K typickým potrebám procesu patrí **elektrina**, **technická para**, **chladivá**, **stlačený vzduch**, **chladiaca voda**, horúca voda, horúci olej, **technická**, demineralizovaná a miestna voda.

Náklady na tieto pomôcky sú užitočné pre procesných inžinierov, projektových plánovačov a inžinierov vo všetkých odvetviach priemyslu, kde sú technické pomôcky významnou súčasťou všetkých výrobných operácií.

Systémy pomocných potrubí sa špecifikujú na samostatnom PFD pre každú pomocnú položku, často známe aj ako **vývojové diagramy**. Tieto diagramy naznačujú, kde pomocné potrubia pripojiť na procesné prívody alebo zariadenia a zobrazujú aj prepojovacie zbernice.

Pomocnými médiami je najmä para, **stlačený vzduch**, **systémy rozvodu technickej a chladiacej vody** ale patrí sem aj **inertný plyn**, vákuum a **hasiaca voda**.

Najbežnejšie dnes používané PFD symboly pochádzajú od inštitúcií ako je [Medzinárodná Organizácia pre Normalizáciu](#) (ISO 10628 – Vývojové diagramy pre výrobné podniky), [Nemecký Ústav pre Normalizáciu \(DIN\)](#) a [Ústav Amerických Národných Noriem - American National Standards Institute](#) (ANSI.)

Typický PFD diagram pre jednotlivý proces zahŕňa tieto prvky:

- **Hlavné zariadenie:** vrátane názvu a ID čísiel. Ako príklad možno uviesť FSW stroje, kompresory, čerpadlá, CNC zariadenia a chladiace jednotky.
- **Technické potrubie:** Prepravuje médiá, obvykle kvapaliny medzi jednotlivými zariadeniami.
- **Smer toku procesu**
- **Ovládacie ventily a kritické ventily procesu**
- **Hlavný obtok a recirkulačné systémy**
- **Prevádzkové údaje:** Ako tlak, teplota, hustota, prietok média a energetická bilancia. Údaje často zahŕňajú minimum, normál a maximum.
- **Zloženie kvapalín a médií**
- **Názvy prúdenia procesov**
- **Prepojenia s inými systémami**



11.13 Dodatočné operácie pri FSW metóde

- K dodatočným operáciám pri FSW patrí napríklad **vyplnenie kľúčovej dierky**. V inštitúcii HZG – Hamburg bola vyvinutá technológia na vyplňanie krátera. Kráter vzniká na konci zvaru a môže vyžadovať **dodatočnú operáciu** (alebo trecie nitovanie).
- **Brúsne operácie** sú potrebné ak je kráter príliš veľký a možno ho vyplniť. Všeobecne sa uprednostňuje vyhýbať sa príliš veľkým operáciám po FSW procese.



Literatúra

- 1) P. PODRŽAJ, B. JERMAN, D. KLOBČAR , **Welding defects at friction stir welding**, ISSN 0543-5846, METABK 54(2) 387-389 (2015)
- 2) David G. Kinchen, Lockheed Martin Michoud Space Systems, NASA, **NDE of Friction Stir Welds in Aerospace Applications**
- 3) R Hartl*, A Bachmann, S Liebl, A Zens and M F Zaeh , **Automated surface inspection of friction stir welds by means of structured light projection**, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 480 (2019) 012035, IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/480/1/012035
- 4) Neetesh Soni¹, Sangam Chandrashekhar², A. Kumar³, V.R. Chary , **Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review**, International Journal of Engineering and Management Research, Volume-7, Issue-3, May-June 2017
- 5) Bob Carter, NASA Glenn Research Center **Introduction to Friction Stir Welding (FSW)**, <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150009520> 2019-05-03T14:29:39+00:00Z
- 6) Telmo Santos, Pedro Vilaça*, Luísa Quintino Technical University of Lisbon, IST, Secção de Tecnologia Mecânica, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon **Developments in NDT for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds in Aluminium Alloys**
- 7) Jorma Pitkänen, Jonne Haapalainen, Aarne Lipponen, Matti Sarkimo , **NDT of Friction Stir Welds** PLFW 1 to PLFW 5 (FSWL 98, FSWL 100, FSWL 101, FSWL 102, FSWL 103) NDT Data Report, 2014
- 8) Zhili Feng, Yong Chae Lim, **Final Technical Report. Flexible Friction Stir Joining Technology**, Oak Ridge National Laboratory , 2015.
- 9) ESAB, FSW Technical Handbook, 2018.
- 10) Cost Comparison of FSW and MIG Welded Aluminium Panels
- 11) Nuno Mendes, Pedro Neto, Altino Loureiro, António Paulo Moreira, **Machines and control systems for friction stir welding: A review**, Materials and Design 90 (2016) 256–265.
- 12) China FSW Center, **Friction Stir Welding Equipment and System**, 2014-2015.

Literatúra

- 12) Sandra Zimmer, Laurent Langlois, Julien Laye,, Jean-Claude Goussain, Patrick Martin, et al. **Methodology for qualifying a Friction Stir Welding equipment**, 7th International Symposium on Friction Stir Welding - Awaji Island, Japan, May 2008, Awaji Island, Japan. 20p. hal-01088138.
- 13) Sergio M. O. Tavares, **Design and Advanced Manufacturing of Aircraft Structures using Friction Stir Welding**, July 2011 MIT-Portugal Program.
- 14) Pradeep Kumar Tipaji, **E-design tools for friction stir welding: cost, estimation tool**, Master Thesis
- 15) Ahmed M. El-Kassas and Ibraheem Sabry, **A Comparison between FSW, MIG and TIG based on Total Cost Estimation for Aluminum Pipes**, European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2017, 4 (3): 158-163
- 16) João Filipe Gomes Duarte Prior, **APPLICATION AND OPTIMIZATION OF FRICTION STIR WELDING ON ELECTRICAL TRANSFORMERS COMPONENTS**, Master Thesis
- 17) MTS System Corporation, **ISTIR™ Friction Stir Welding Solutions**, 2018.
- 18) Fabrice **SCANDELLA**, **Friction-stir welding of high strength, materials: a literature survey**, 2017, Soudage et techniques connexes.
- 19) Max Hossfeld, Dave Hofferbert, **Challenges and State of the Art in Industrial FSW – Pushing the Limits by High Speed Welding of Complex 3D Contours**, The 12th International Symposium on Friction Stir Welding.
- 20) TWI, **Friction Stir Welding. Future Trends – Internet of Things, Automated Welding and Additive Manufacturing in India**, 2016.
- 21) Wei Tang, Brian T. Gibson, Zhili Feng, Scarlett R. Clark, Oak Ridge National Laboratory, **Report Detailing Friction Stir Welding Process Development for the Hot Cell Welding System**, 2016
- 22) Wang Yisong, Tong Jianhua, Li Congqing, **Application of Friction Stir Welding on the Large Aircraft Floor Structure**, China FSW Center, BAMTRI



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Friction Stir Welding European Qualifications

