

Współczesne kierunki rozwoju obróbki cieplnej stopów żelaza

XI Webinarium Techniczne Akademii Inżynierskiej w Polsce

04 marca 2022



dr hab. inż. Emilia Wołowiec-Korecka, prof. PŁ
Politechnika Łódzka



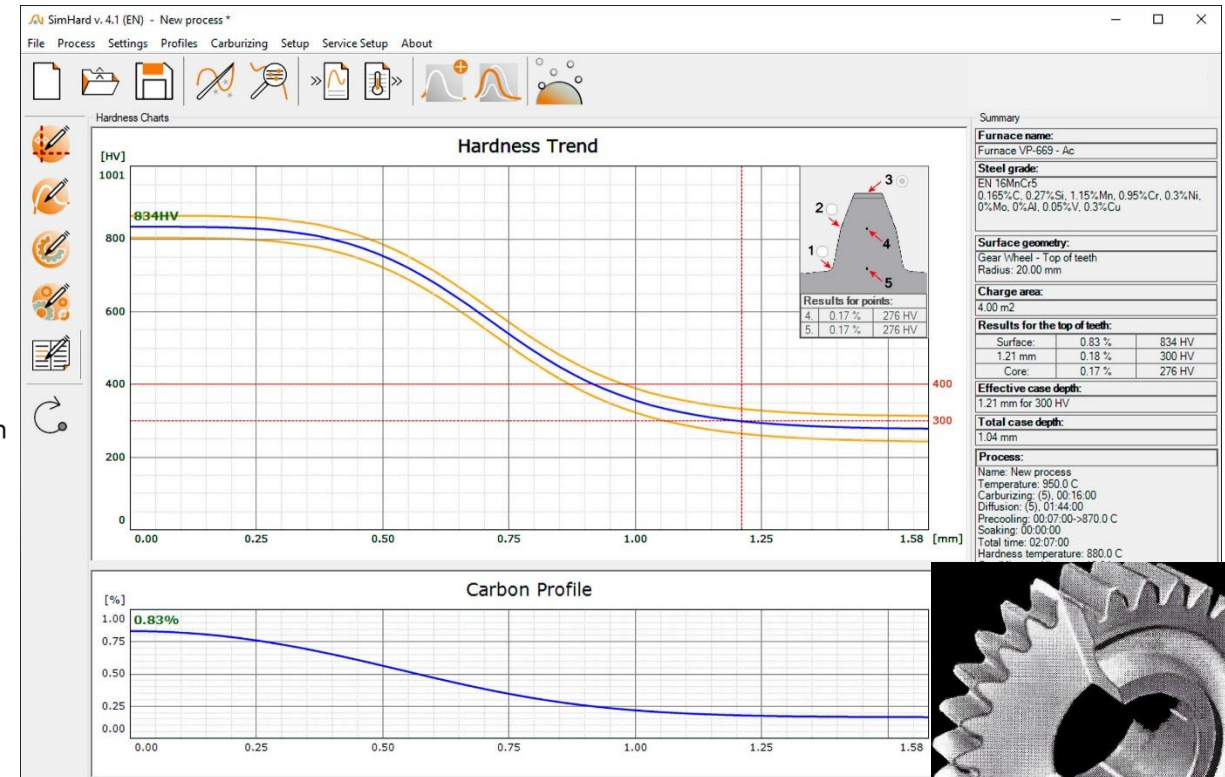
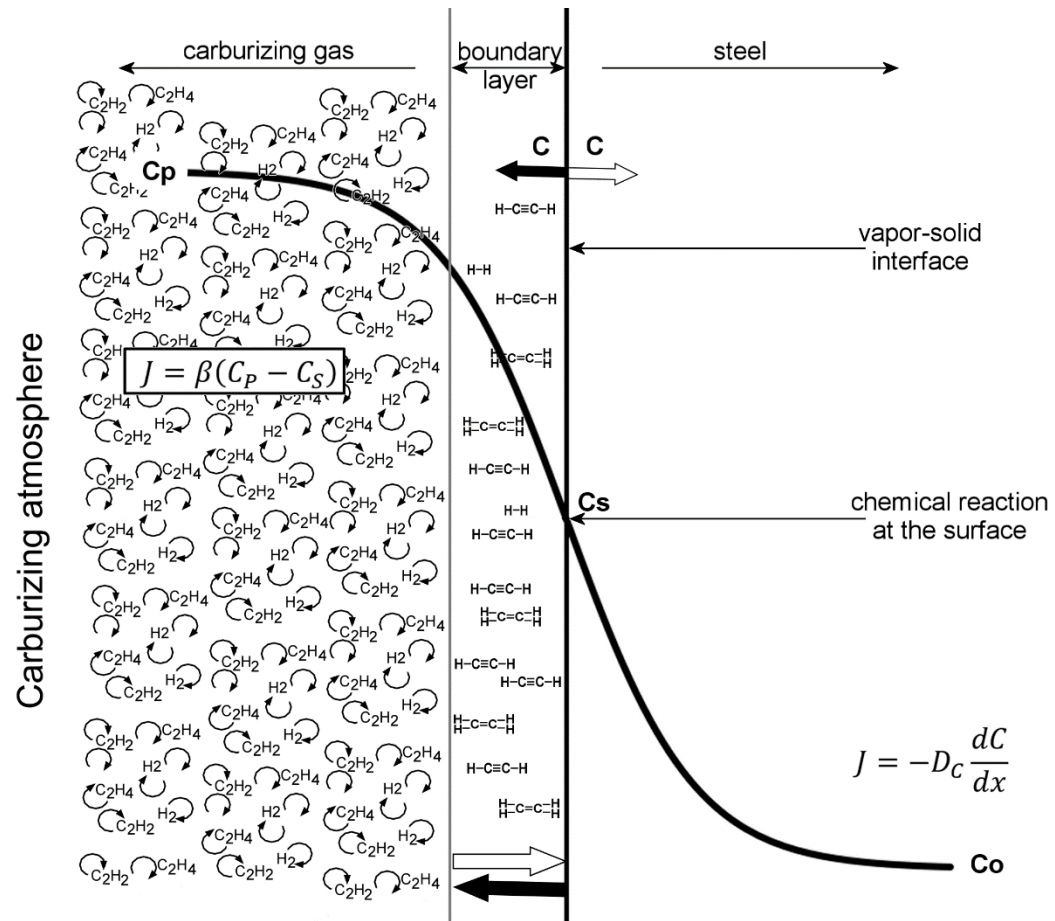
Źródło: W. Callister „Materials Science and Engineering” (2014)

Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna

Przekładnia zębata z utwardzoną warstwą wierzchnią

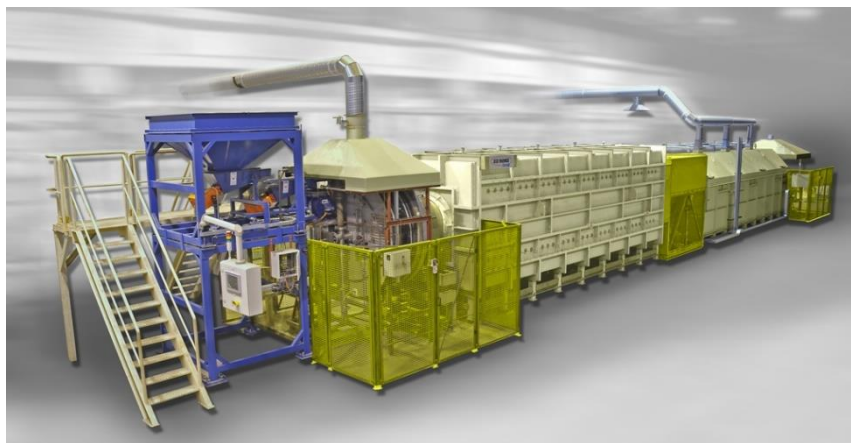
- Zewnętrzna powierzchnia elementu została selektywnie utwardzona poprzez obróbkę cieplną w wysokiej temperaturze, podczas której węgiel z otaczającej atmosfery dyfundował do powierzchni.
- Warstwa utwardzona (zawierająca zwiększoną ilość węgla) pojawia się jako ciemna zewnętrzna obręcz segmentu koła zębatego, który został przecięty.
- Wzrost zawartości węgla zwiększa twardość powierzchni, co z kolei prowadzi do poprawy odporności przekładni na zużycie. Ponadto w obszarze warstwy utwardzonej wprowadzane są szczątkowe naprężenia ściskające, które powodują zwiększenie odporności przekładni na uszkodzenia spowodowane zmęczeniem podczas eksploatacji.
- Koła zębate ze stali nawęglanej są stosowane w przekładniach samochodowych, np. skrzyniach biegów.

Chemia procesu nawęglania

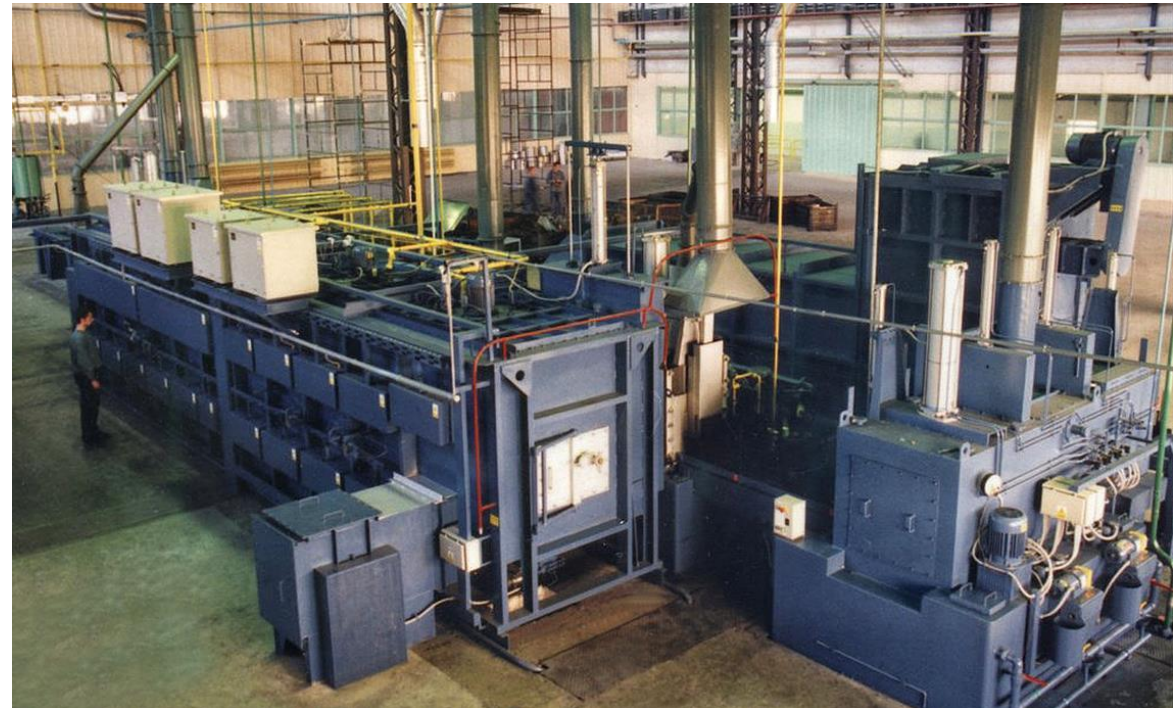


Źródło: E. Wołowicz-Korecka et al. Calculation of the mixture flow in a low-pressure carburizing process. *Metals* 2019, 9, 439-446. DOI:10.3390/met9040439

Atmosferowe urządzenia do ulepszania cieplnego

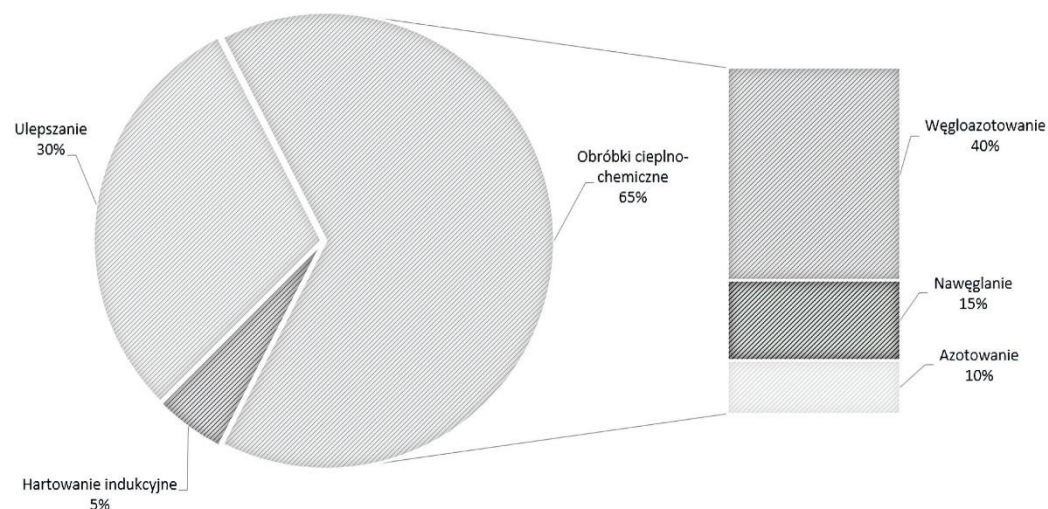


Nawęglanie prowadzone w atmosferze endotermicznej
Hartowanie prowadzone w oleju
Ogromne instalacje

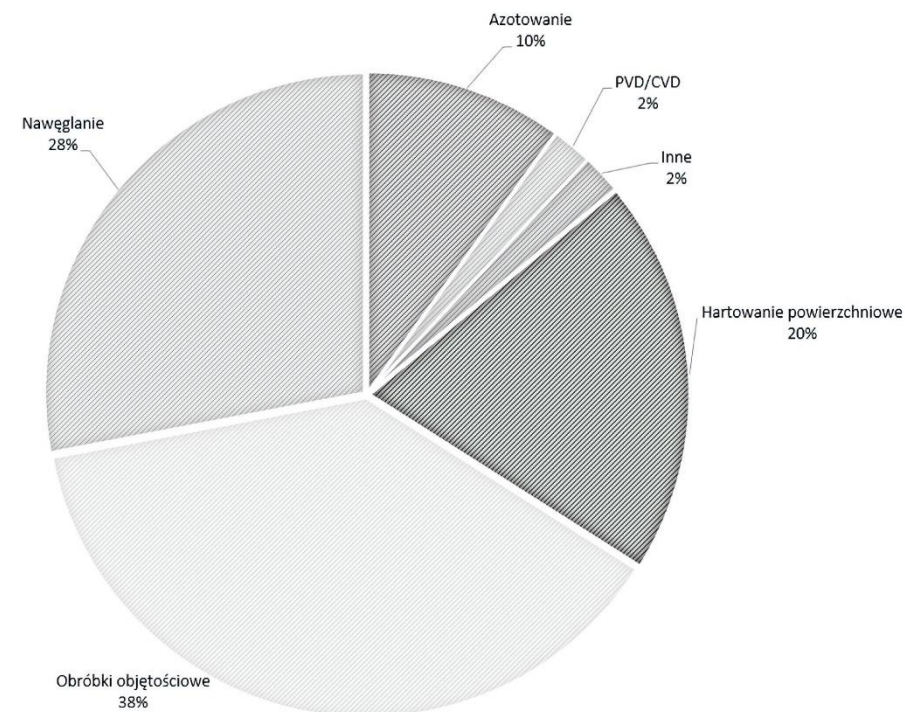


Próżniowa obróbka cieplna

Udział poszczególnych rodzajów obróbek cieplnych i powierzchniowych na świecie w 1995 r.



Udział poszczególnych rodzajów obróbek cieplnych i powierzchniowych w Polsce w 1999 r.



Wady tradycyjnego ulepszania cieplnego

- **Duże odkształcenia hartownicze, niska precyzja i powtarzalność**
- Utlenianie granic ziarn
- Brak możliwości monitorowania pojedynczych sztuk
- Wysokie koszty oprzyrządowania urządzeń OC
- Wysokie koszty utrzymania linii produkcyjnych
- Niska elastyczność procesu i sposobu jego działania
- Wysokie koszty neutralizacji produktów ubocznych
- Ryzyko pożaru i wybuchu
- Kwestie ochrony środowiska



Próżniowa obróbka cieplna

- Urządzenia do obróbki cieplnej wykorzystujące próżnię (podciśnienie) jako atmosferę ochronną lub procesową



Możliwości próżniowej obróbki cieplnej

Możliwości zastosowań

- Lutowanie
- Wyżarzanie
- Hartowanie (olej lub/i HPGQ)
- Nawęglanie (LPC)
- Azotowanie (LPN)
- Spiekanie

Cechy obróbki próżniowej

- Ekonomiczna
- Wydajna
- Dokładna
- Szybka
- Bezpieczna
- Możliwa do wykonania „na żądanie”
- O niskich kosztach utrzymania
- Czysta
- Przyjazna dla środowiska

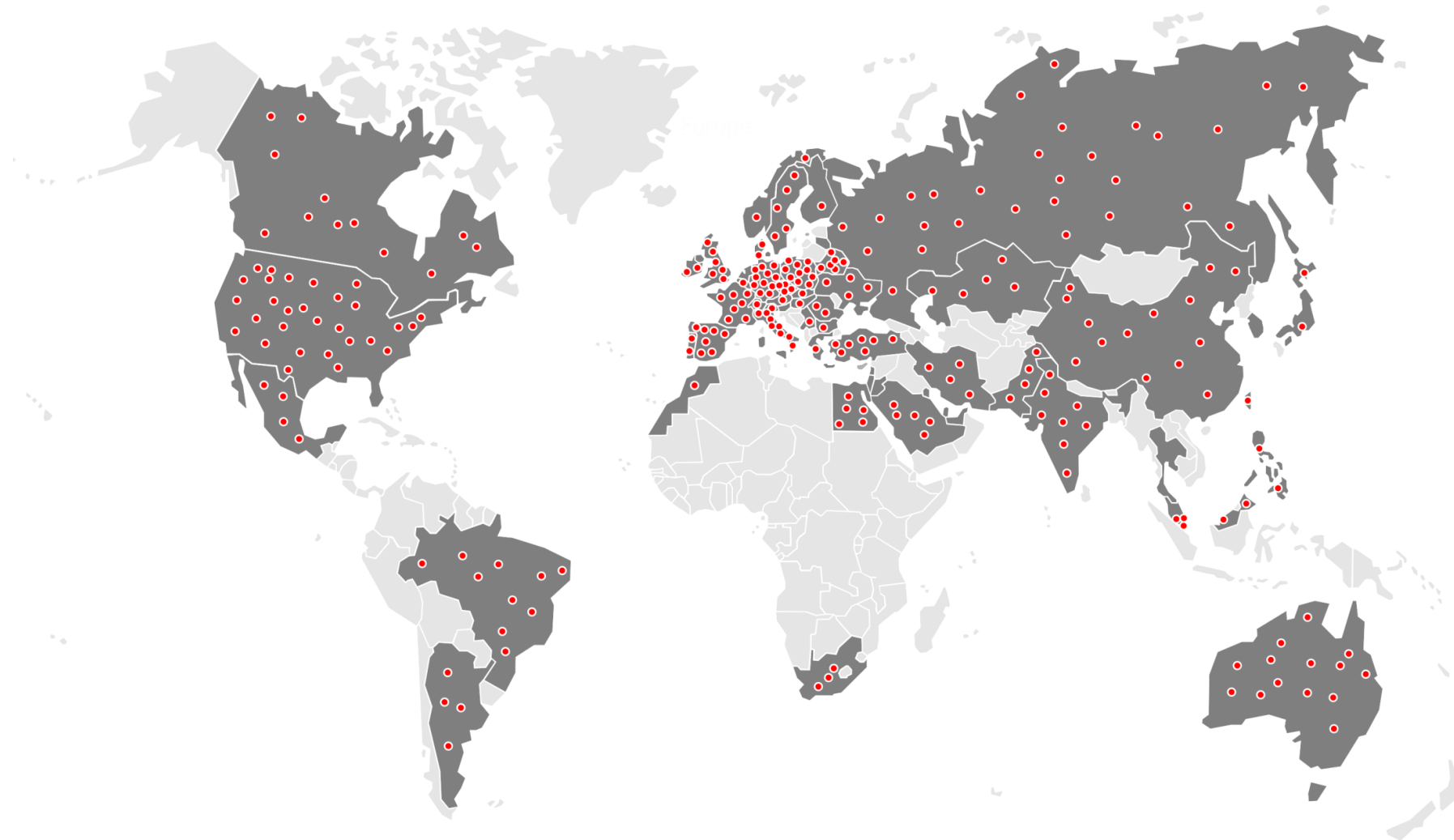
Proces próżniowy vs atmosfery

- Doskonała jednorodność i jakość wyników procesu
- Idealna jakość powierzchni
- Redukcja kosztów procesu (do 50%)
- Szybkie, wysokotemperaturowe procesy LPC (4-5 razy w 1050 C)
- Minimalne zużycie gazów procesowych (100 razy mniej)
- Redukcja zużycia energii (do 50%)
- Wysoka czystość atmosfery próżniowej (poniżej 1 ppm)
- Zero czasu na przygotowanie i kondycjonowanie atmosfery
- Zerowy czas uruchamiania i wyłączenia
- Bezpieczny, bez otwartego ognia, bez ryzyka pożaru ani wybuchu
- Niska emisja ciepła i produktów ubocznych (zero CO & CO₂)
- Czystość procesu
- Przyjazny dla środowiska

Hartowanie gazowe vs olejowe

- Niższe zniekształcenia hartownicze (kilka razy)
- Redukcja kosztów obróbki po hartowaniu (kilkakrotnie)
- Mniejsze naddatki na zniekształcenia, krótszy czas procesu (do 20%)
- Mniejsze całkowite koszty produkcji (kilka razy)
- Pełna kontrola prędkości chłodzenia (zaawansowane chłodzenie poprawia właściwości mechaniczne)
- Brak mycia elementów po hartowaniu, mniejszy koszt inwestycji (ponad 50 tys. EUR)
- Bez oleju, bez chemikaliów, bez kosztów neutralizacji
- Brak emisji i zanieczyszczeń (cyrkulacja azotu)
- Czysty proces
- Przyjazny dla środowiska

Próżniowa obróbka cieplna na świecie



Zastosowania przemysłowe próżniowej obróbki cieplnej

Przemysł lotniczy i energetyczny 50 %
Przemysł narzędziowy i medyczny 25 %
Przemysł motoryzacyjny i maszynowy 25 %



Źródło: Internet



Źródło: Internet



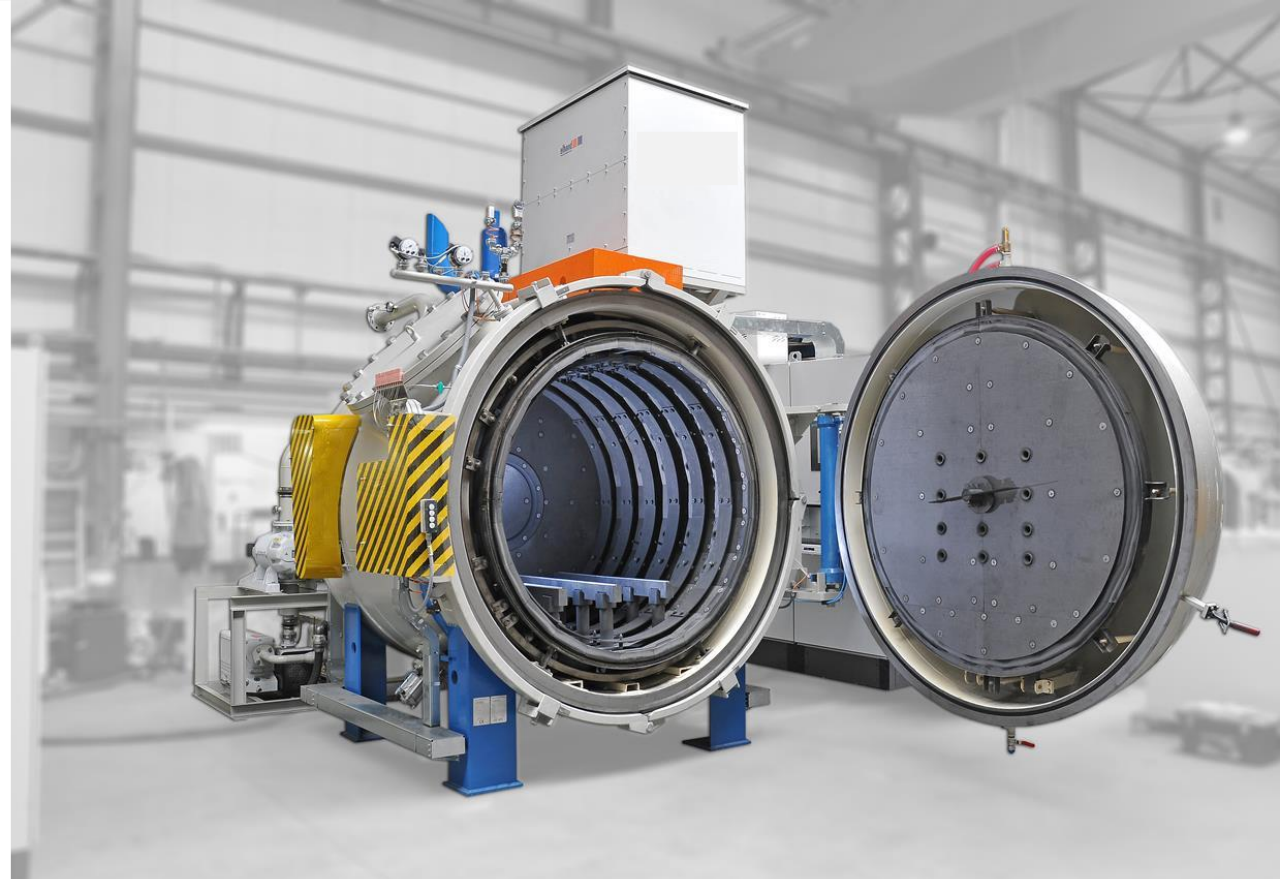
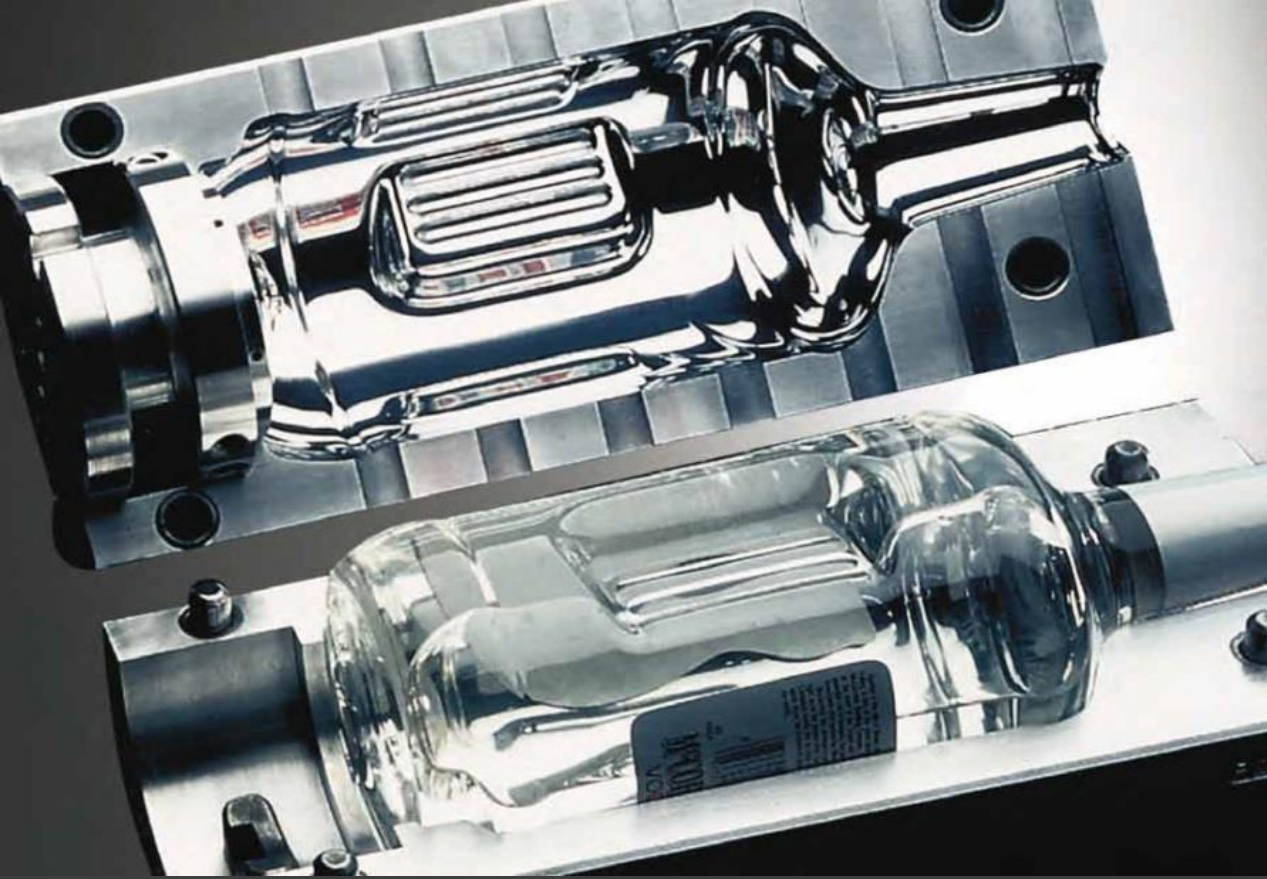
Źródło: Internet



Źródło: Internet

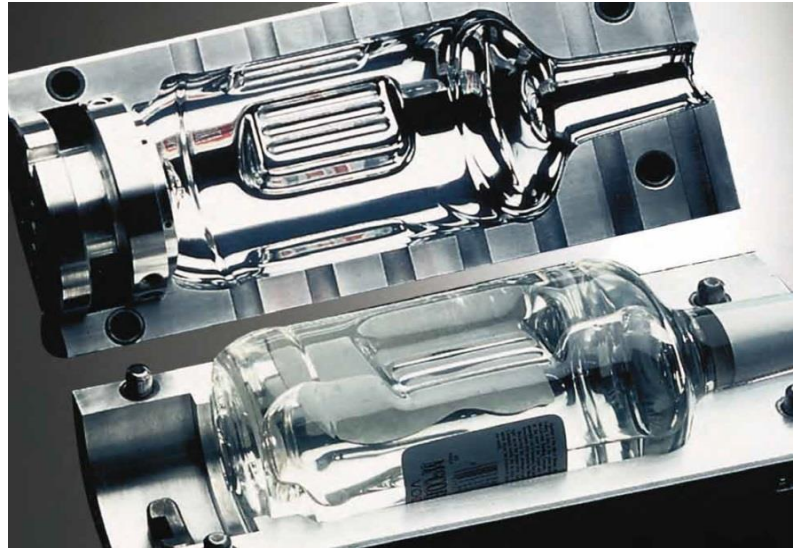


Źródło: Internet

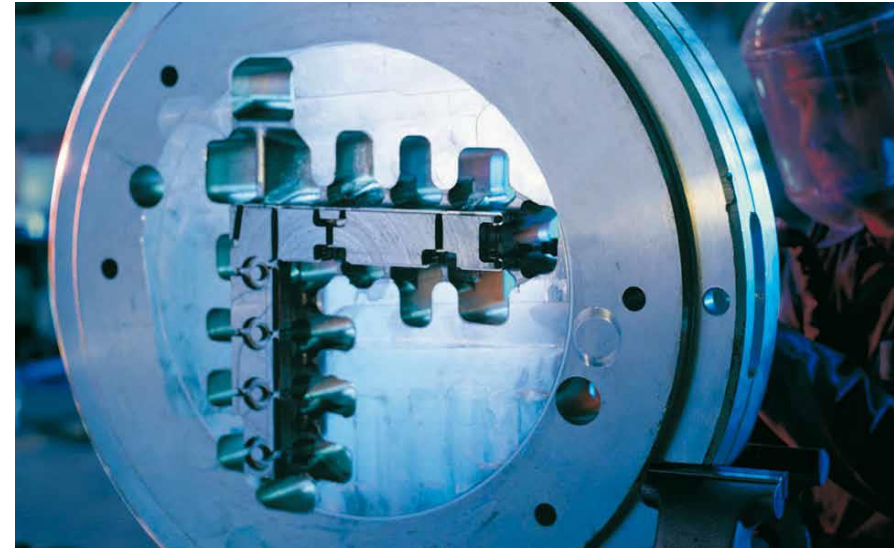


Obróbka narzędzi i matryc

Matryce, formy, narzędzia do wyciskania



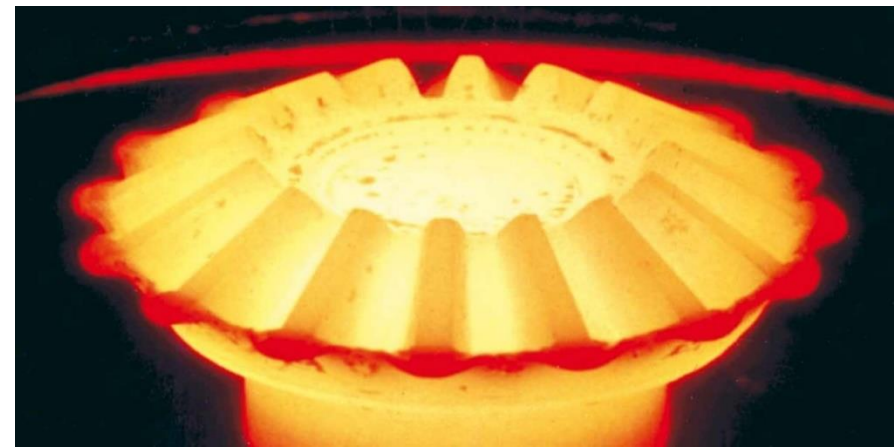
Źródło: Internet



Źródło: Internet

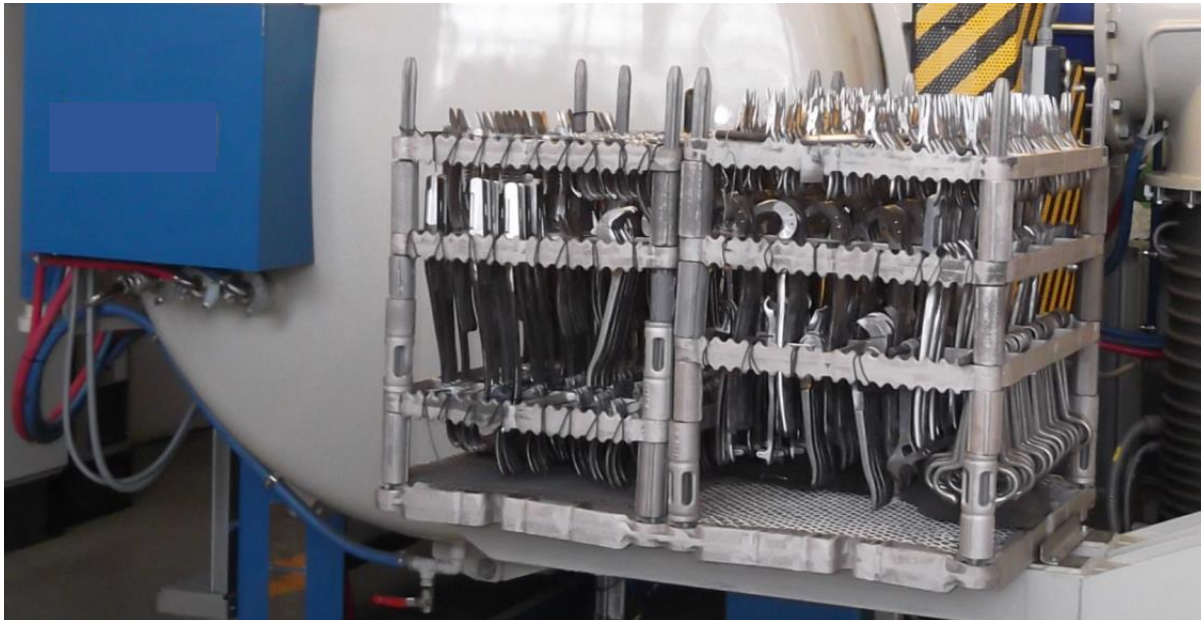


Źródło: Internet

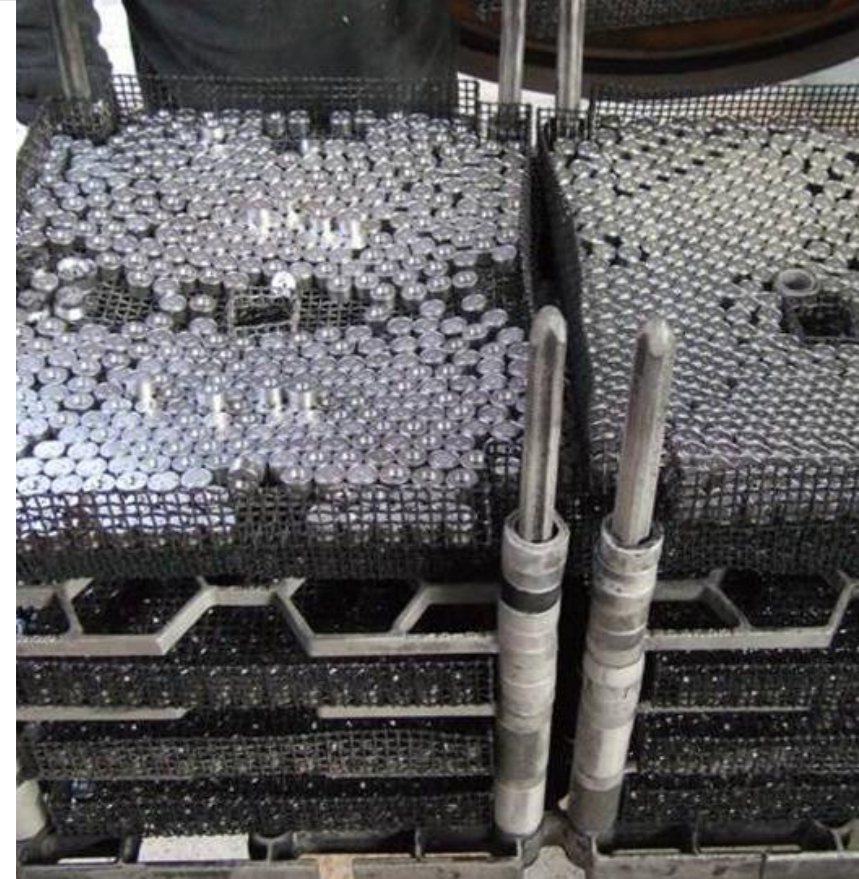
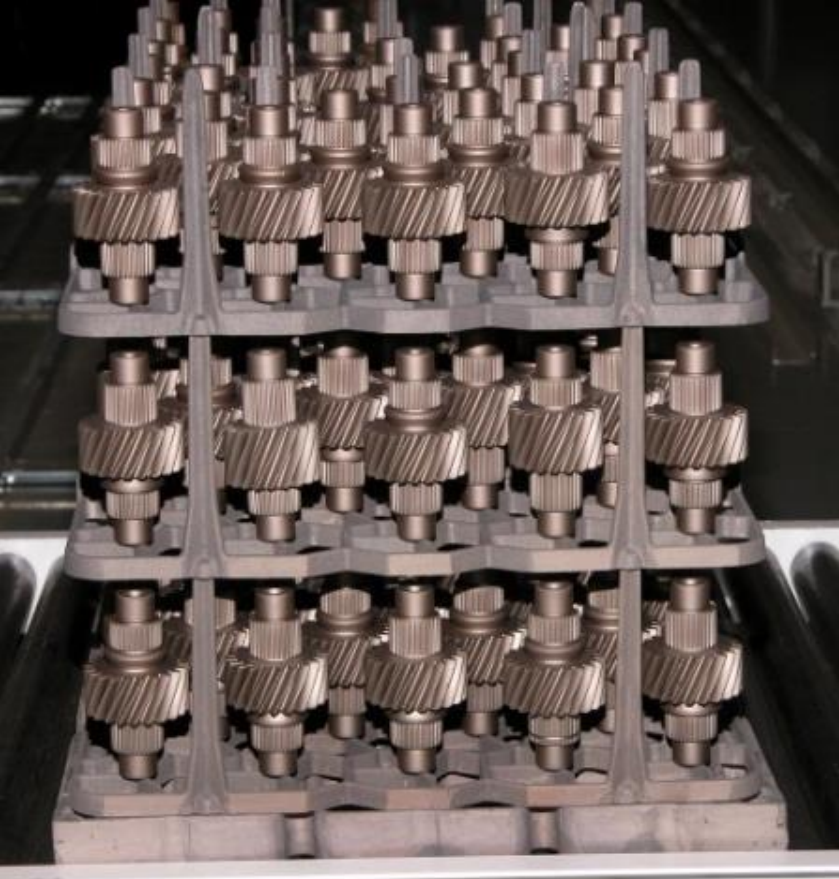


Źródło: Internet

Hartowanie w gazie pod wysokim ciśnieniem (HPGQ)

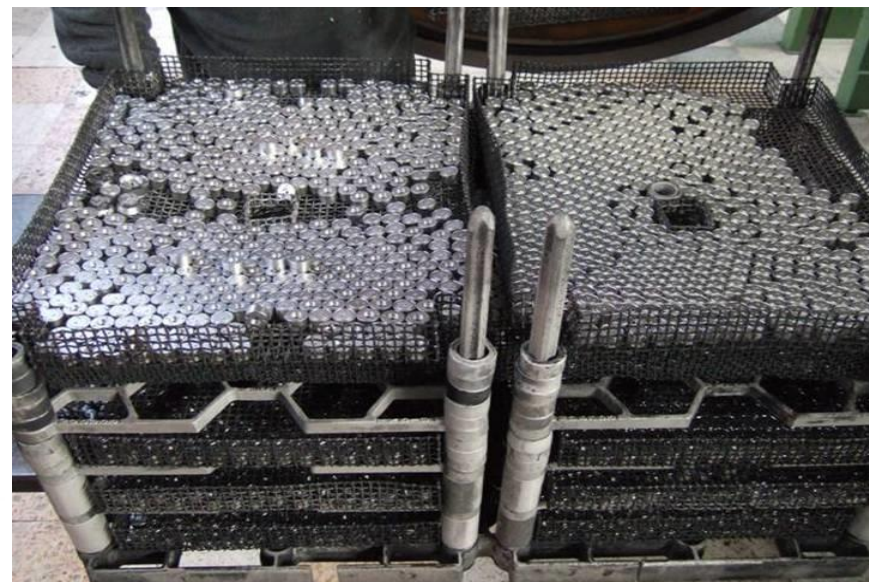
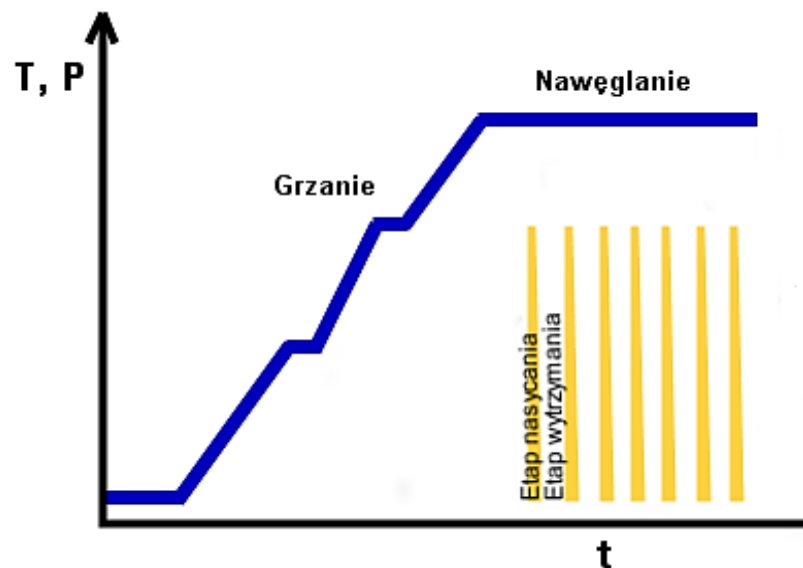


Stale narzędziowe szybkotnące - narzędzia



Nawęglanie niskociśnieniowe LPC

Nawęglanie niskociśnieniowe



Nawęglanie niskociśnieniowe

Zakres temp. 860-1100°C

Ciśnienie robocze: 5-8 hPa

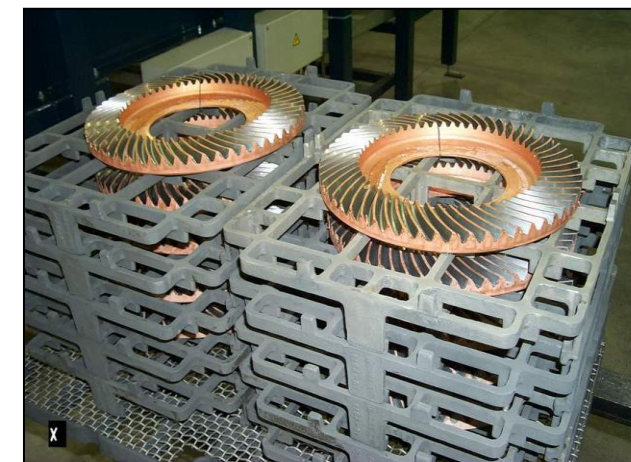
Przykładowe stale do nawęglania

EN 15CrNi6,

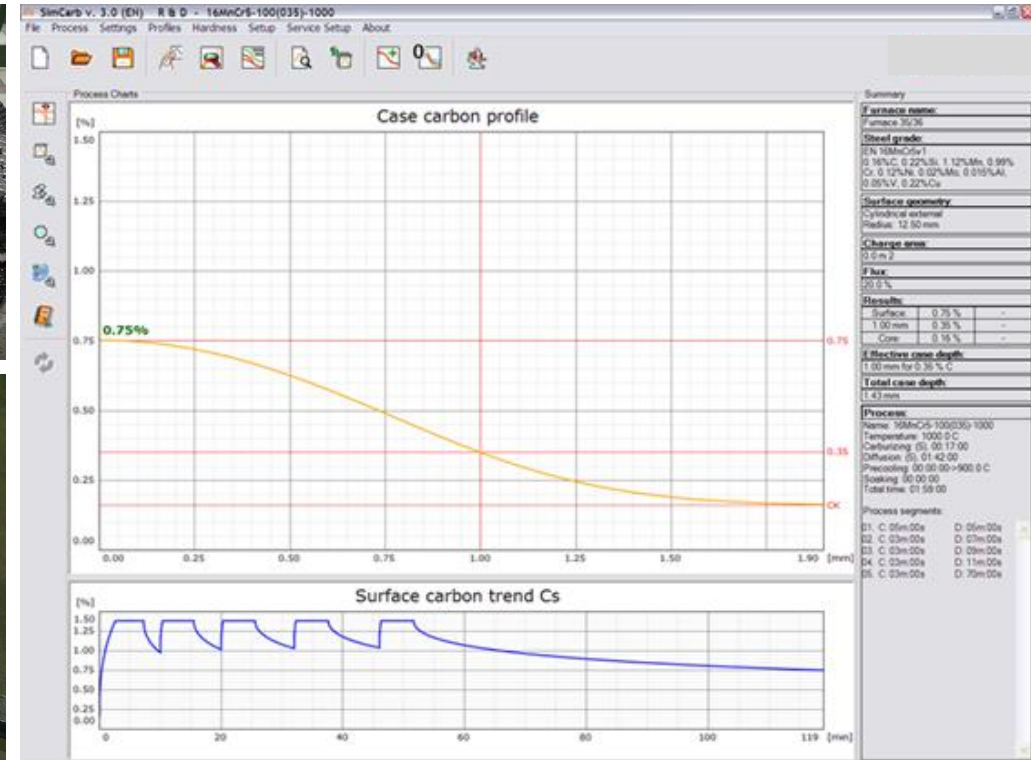
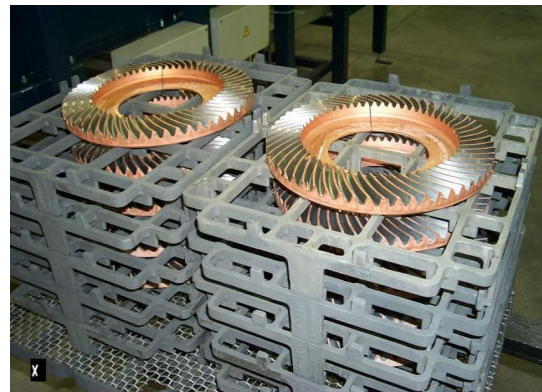
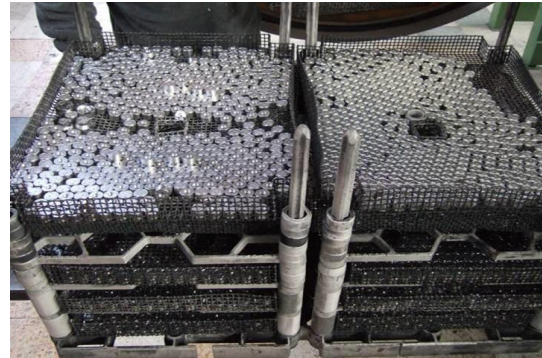
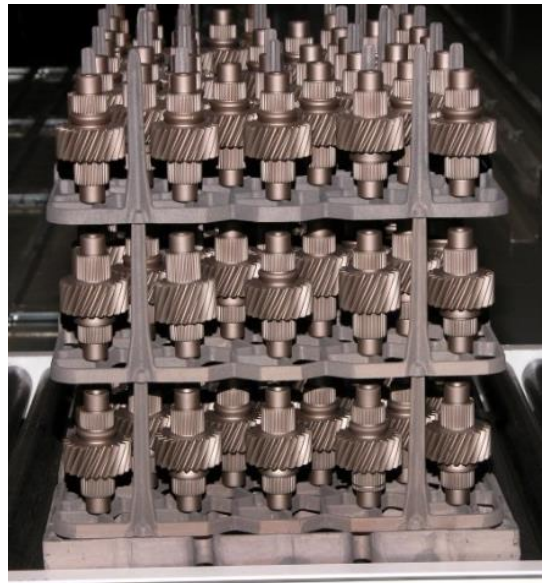
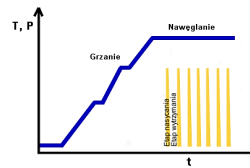
EN 16MnCr5,

EN 18CrMo4,

EN 20CrMnTi



Nawęglanie niskociśnieniowe





Źródło: Internet



Źródło: Internet



Obróbka elementów do celów
lotniczych

Obróbka elementów do celów lotniczych



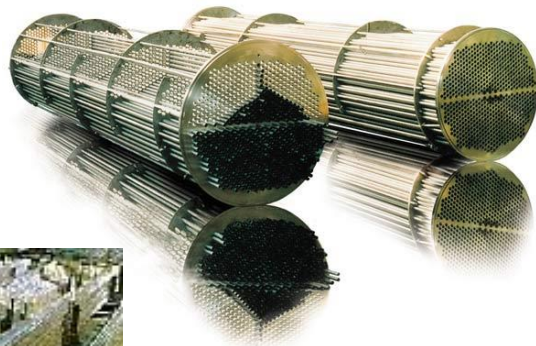
Źródło: Internet





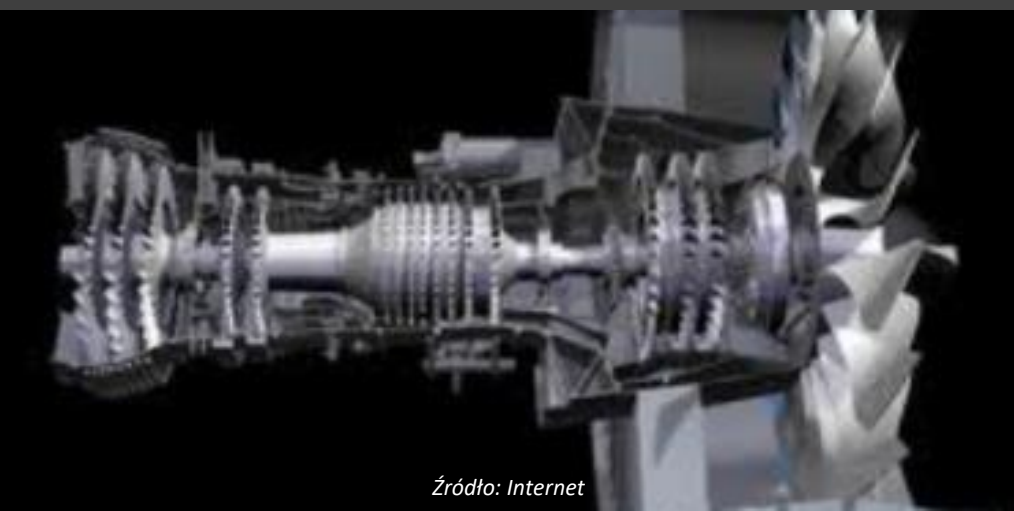
Zastosowania specjalne

Zastosowania specjalne: wymiennik ciepła





Źródło: Internet

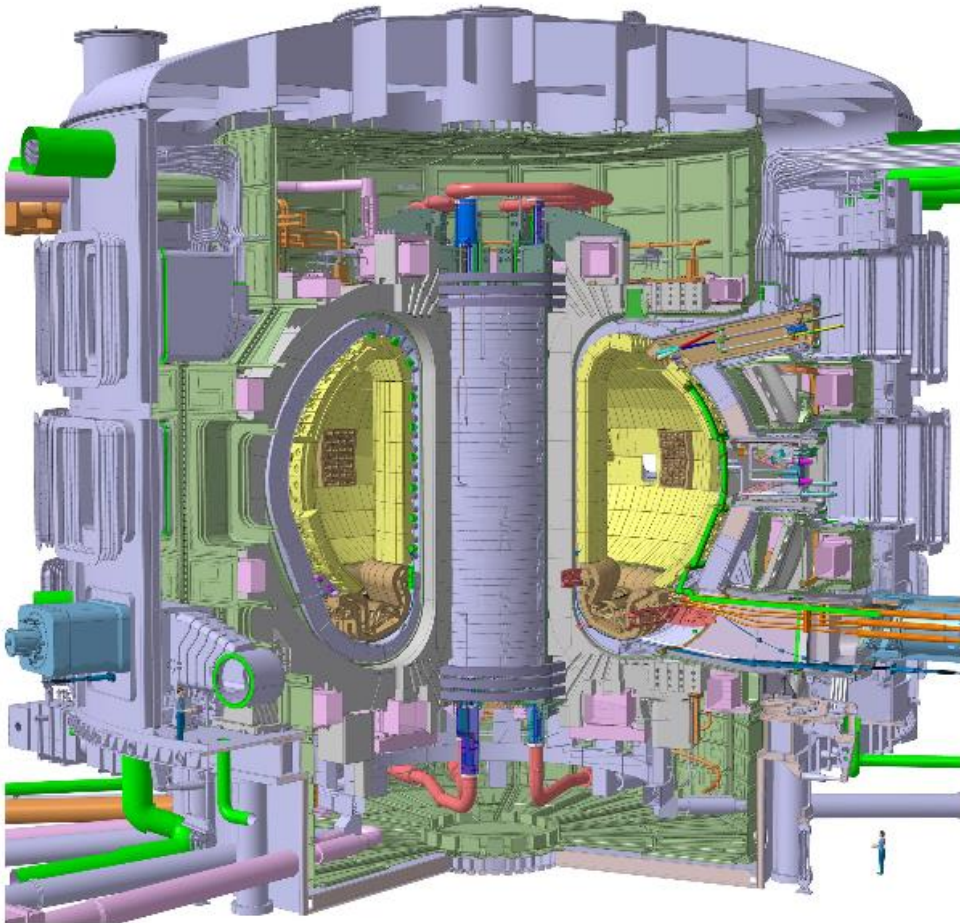


Źródło: Internet

Zastosowania specjalne: obróbka wałów silników odrzutowych

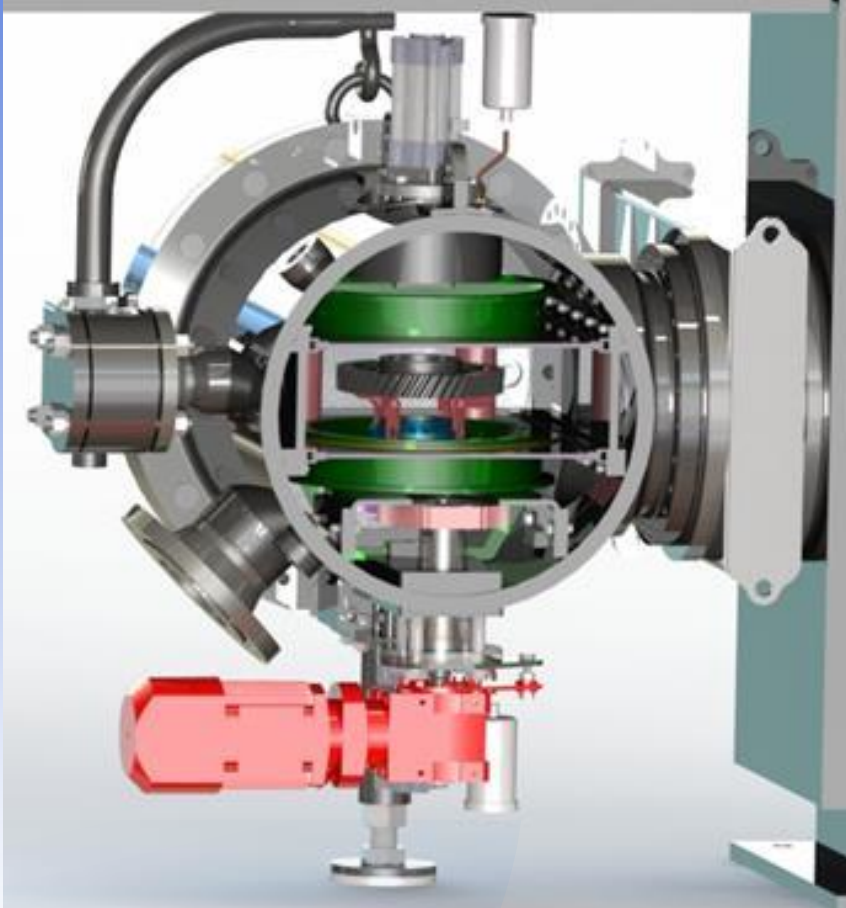
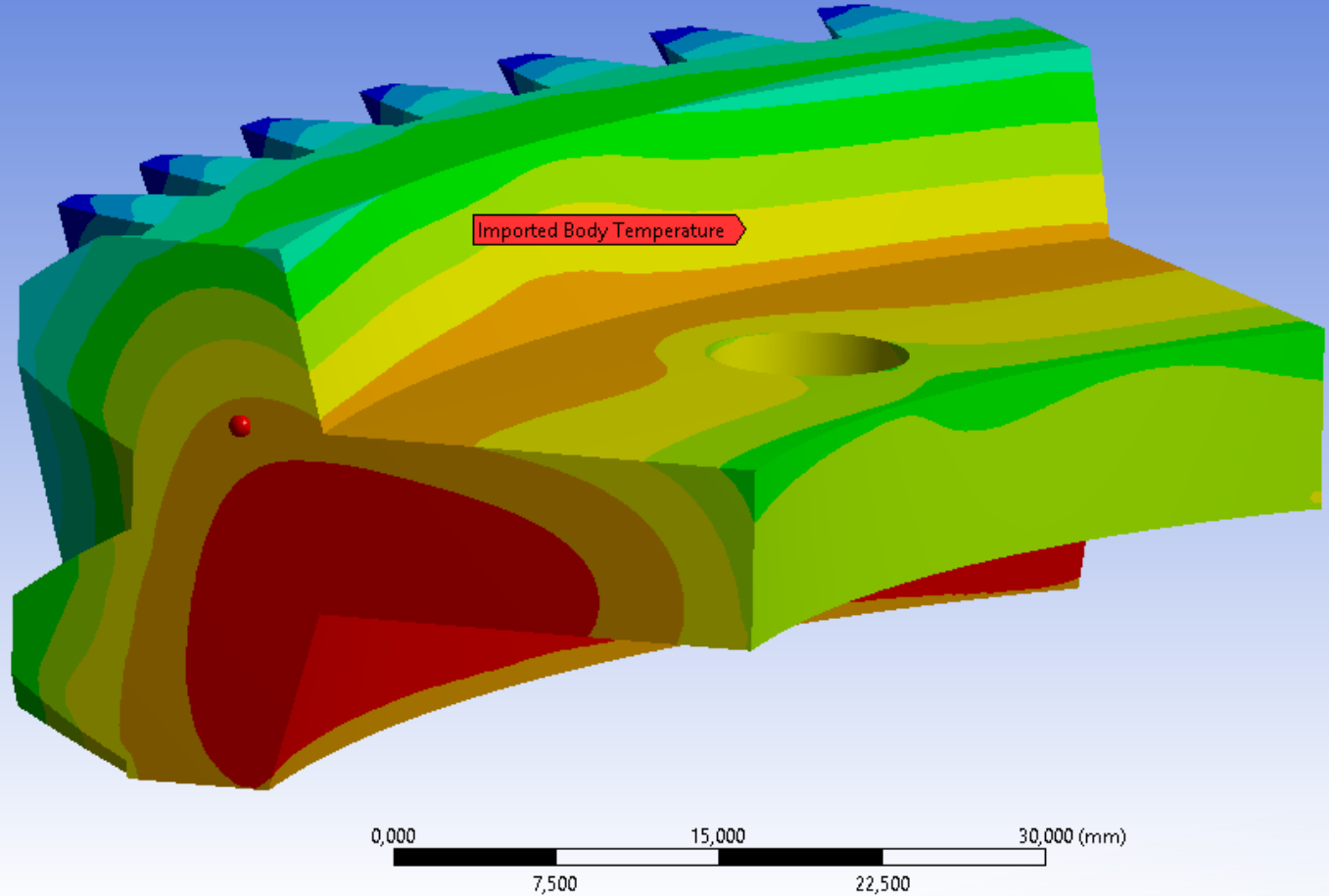
Zastosowania specjalne: nadprzewodnik do centralnego magnesu ITER

- International Thermonuclear Experimental Reactor - Międzynarodowy eksperymentalny reaktor termojądrowy



Źródło: Internet





Przyszłościowe kierunki rozwoju

Wady tradycyjnego ulepszenia cieplnego: odkształcenia hartownicze, niska precyzja i powtarzalność



$t(1), T(1), C(1), Q(1)$

$t(2), T(2), C(2), Q(2)$

$t(3), T(3), C(3), Q(3)$

$t(1) \neq t(2) \neq t(3)$

$T(1) \neq T(2) \neq T(3)$

$C(1) \neq C(2) \neq C(3)$

$Q(1) \neq Q(2) \neq Q(3)$

$ECD(1) \neq ECD(2) \neq ECD(3)$

Result [ECD] = F[time (t), temperature (T), atmosphere (C), quenching (Q)]

Światowa produkcja pojazdów silnikowych w 2014

Potrzeby: 86,5 mln nowych pojazdów/rok
- 86,5 mln skrzyń biegów/rok
- **ponad 600 mln gears/rok**

Wzrost: 3,6 %/rok
ponad 20 mln gears/rok



Źródło: Internet



Źródło: Internet



Źródło: Internet

Koszty obróbki wykańczającej (usuwanie odkształceń hartowniczych po OC)



Automotive and Transmission Industry in Germany

~ **850 Mill. Euro** for removal of distortion

1995 Germany – 2 bln USD/year
2018 Worldwide - 20 bln USD/year



Rolling Bearing Industry worldwide

~ 4% of total sales for removal of distortion

⇒ ~ **1 Billion Euro / a**

acc. to Volkmuth / SKF

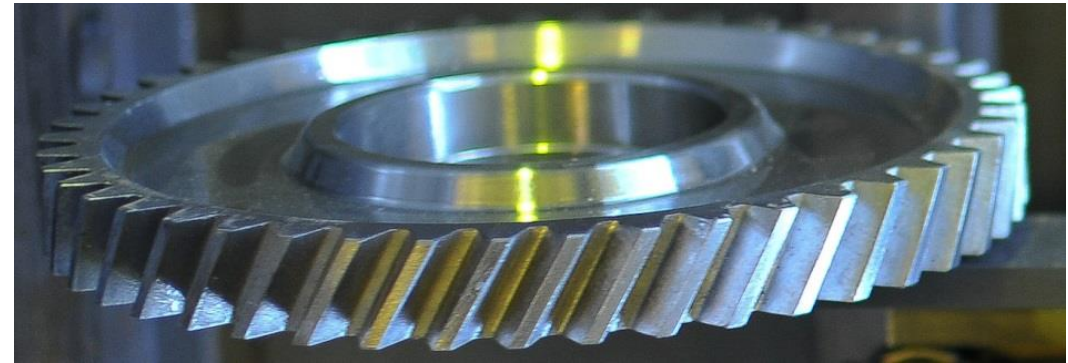
Figs.: FAG



IWT Bremen
Werkstofftechnik

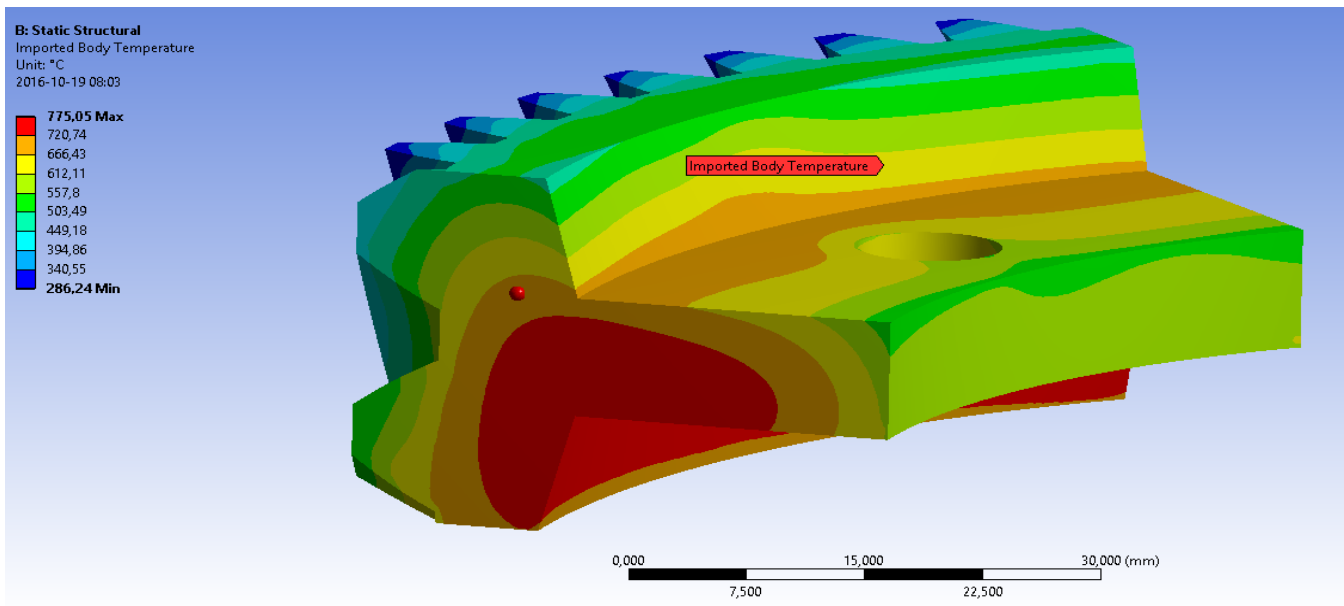
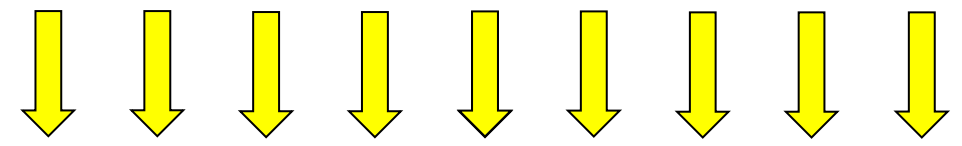
Economic consequences of distortion

3
SFB
570



Odkształcenia hartownicze - one Direction cooling

Nitrogen 20 bar, 15 m/s
top to bottom

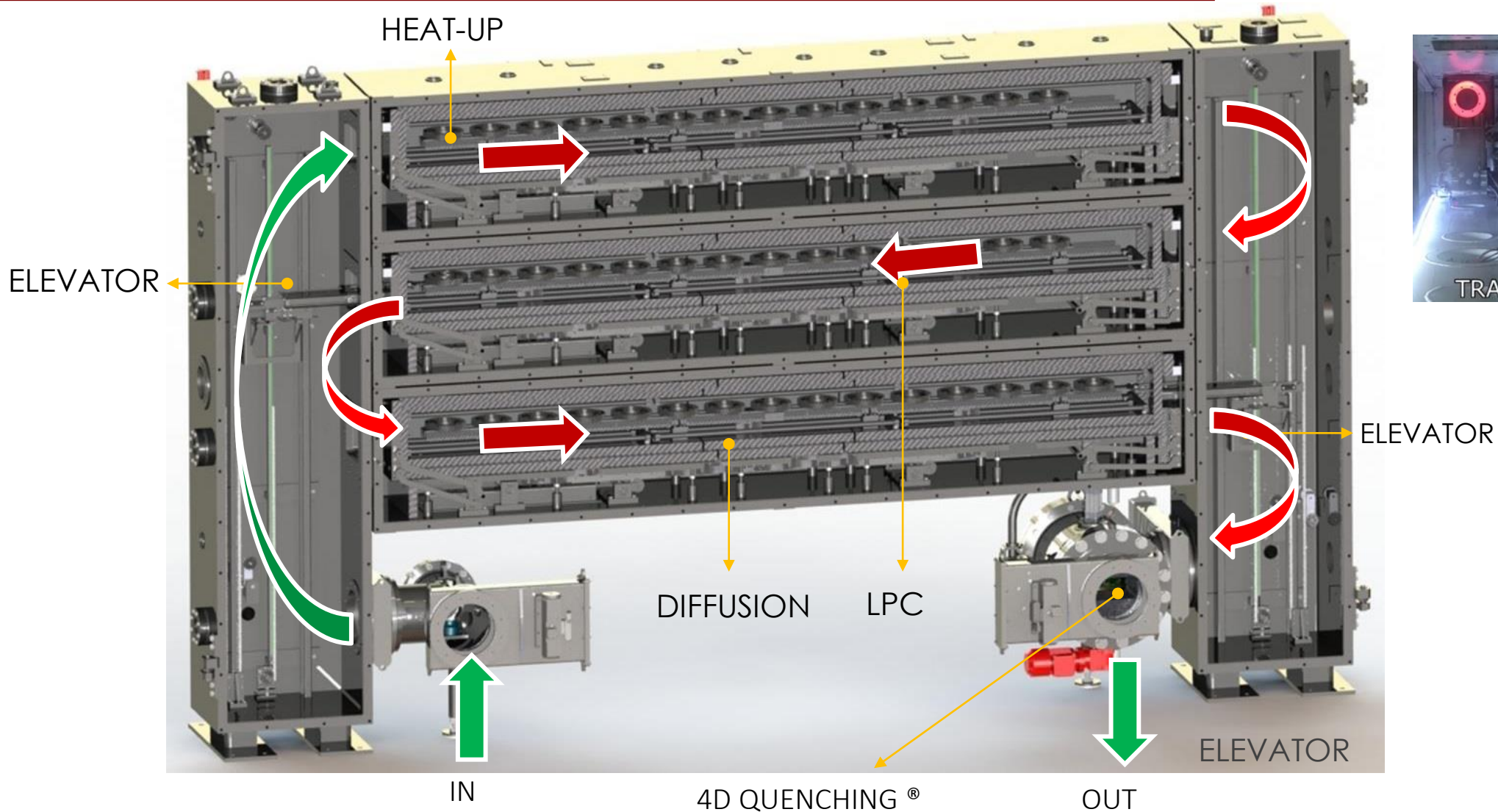


Temperature gradient = distortion

One side cooling



Obróbka cieplna z potokowym przepływem elementów



Urządzenie do OC z potokowym przepływem elementów



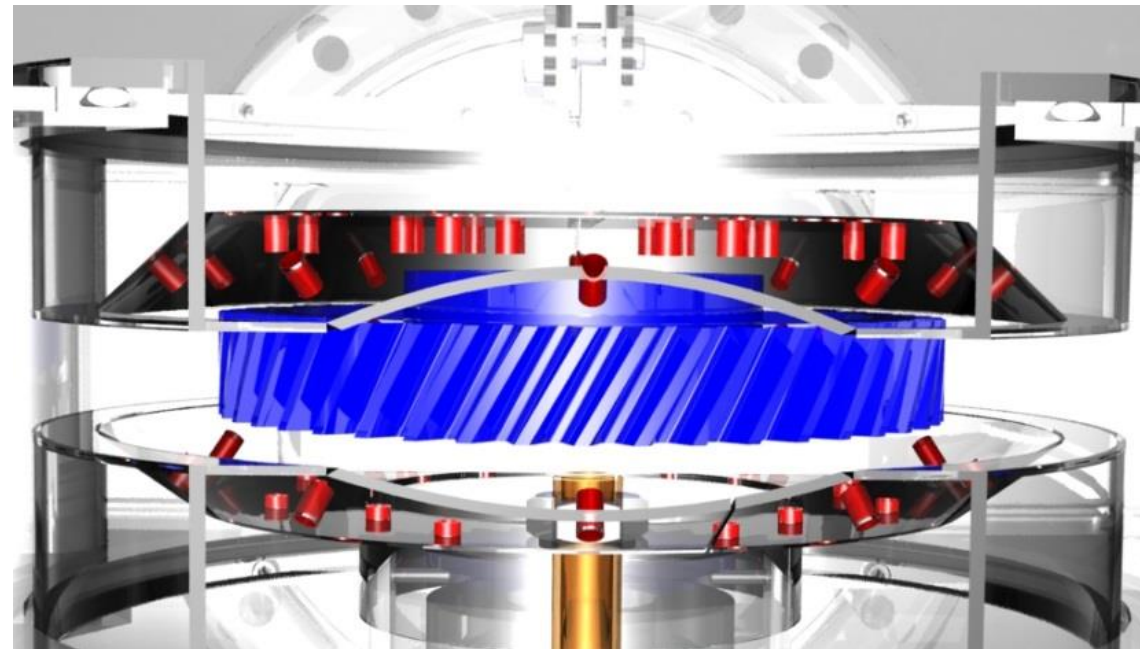
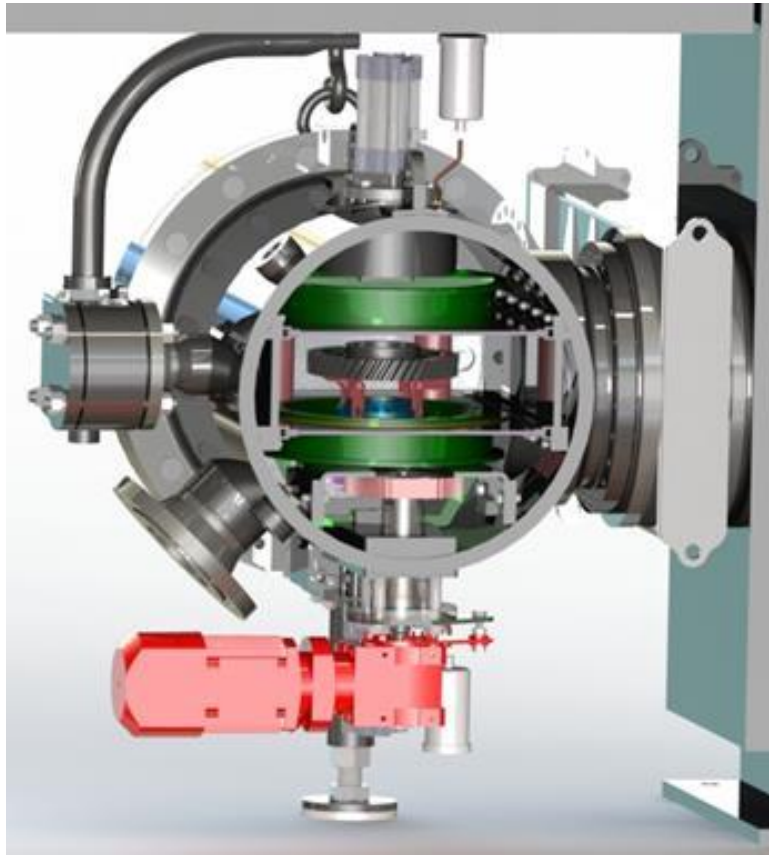
**Prototyp systemu *single-piece flow* -
przemysłowa instalacja pilotażowa (2020)**

Precyzyjna i powtarzalna realizacja
obróbek:

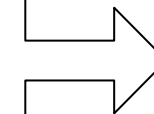
- nawęglanie niskociśnieniowe LPC
- hartowanie w gazie po wysokim ciśnieniu (HPGQ)
- odpuszczanie

**Wielokomorowe urządzenie do
wysokowydajnej i precyzyjnej obróbki
cieplnej elementów przekładni
mechanicznych**

Hartowanie 4D

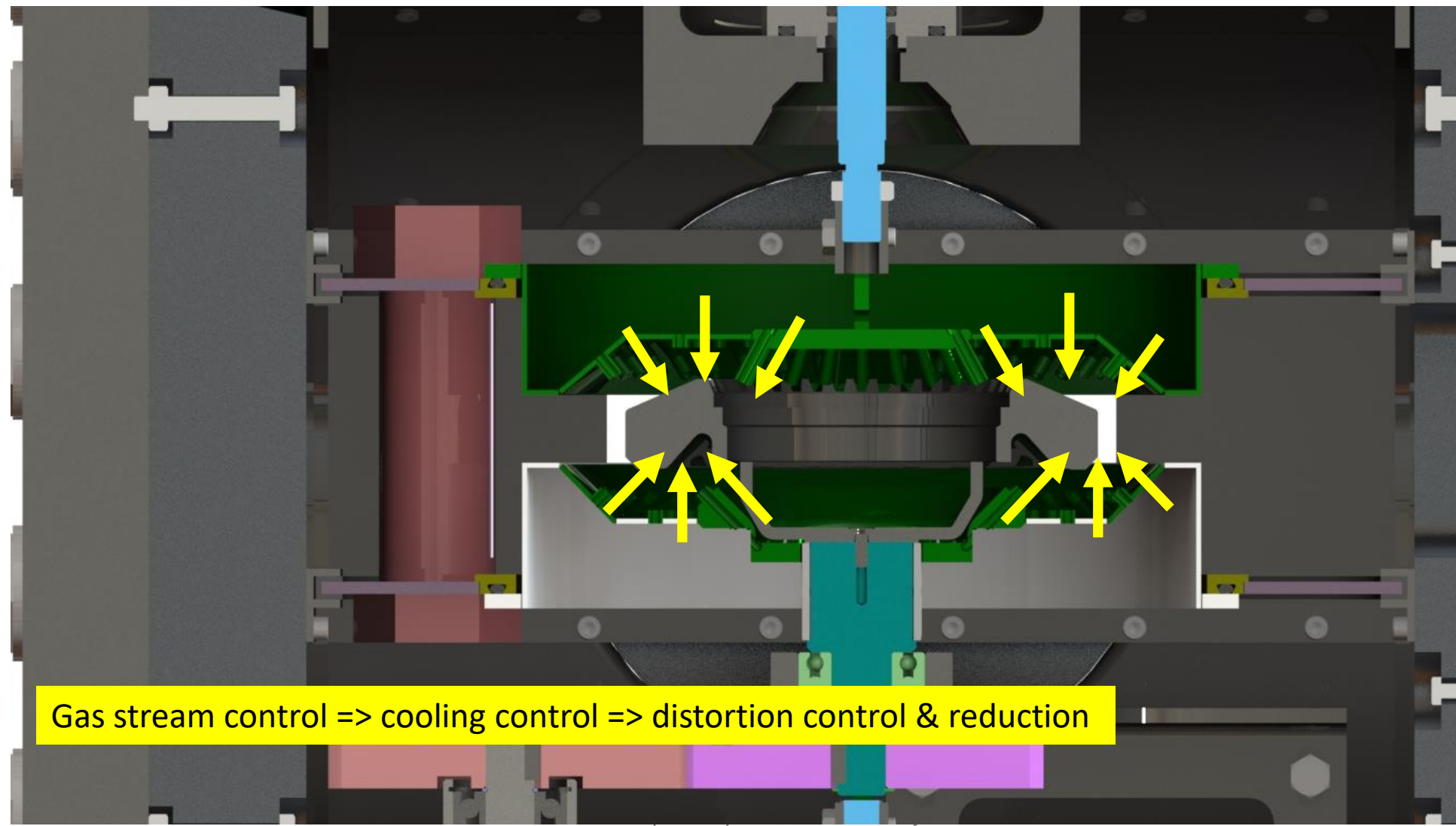


- Stationary
- Rotation (rpm and direction)
- Oscillation (angle)
- Time depend gas flow



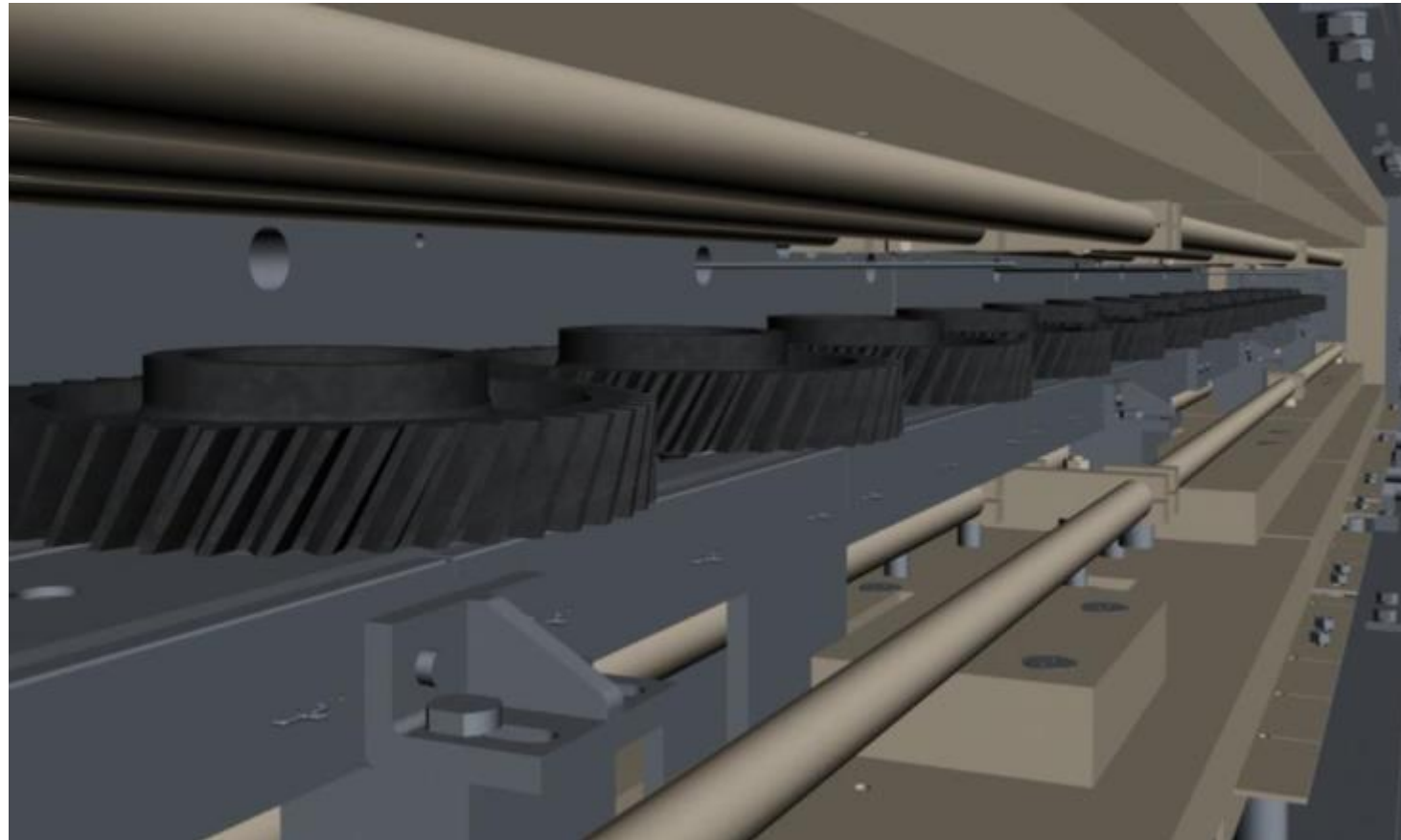
Cooling control

Hartowanie 4D

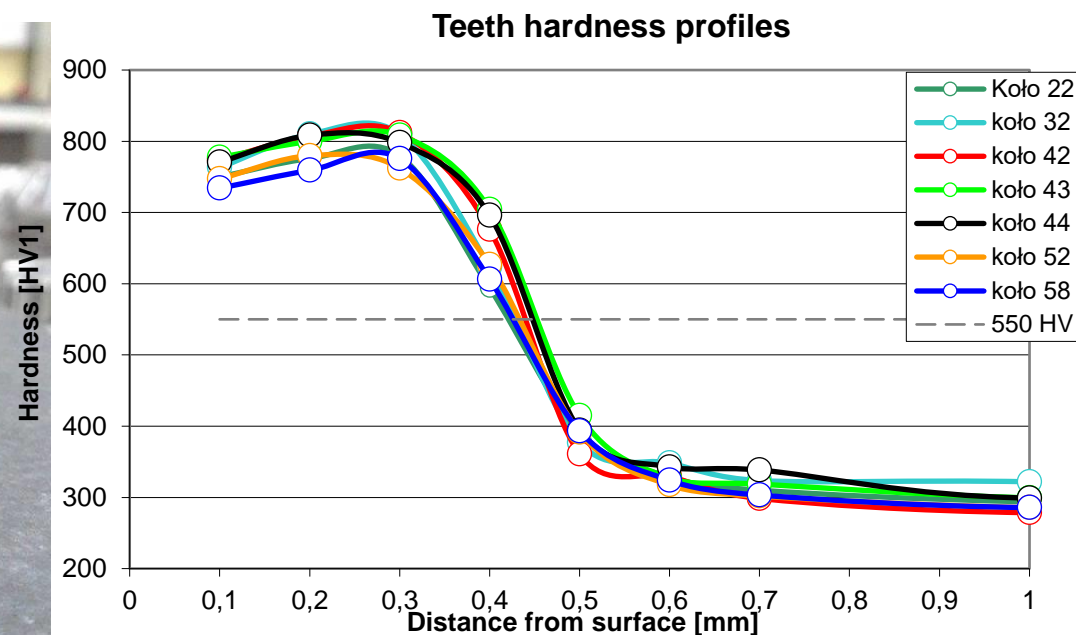
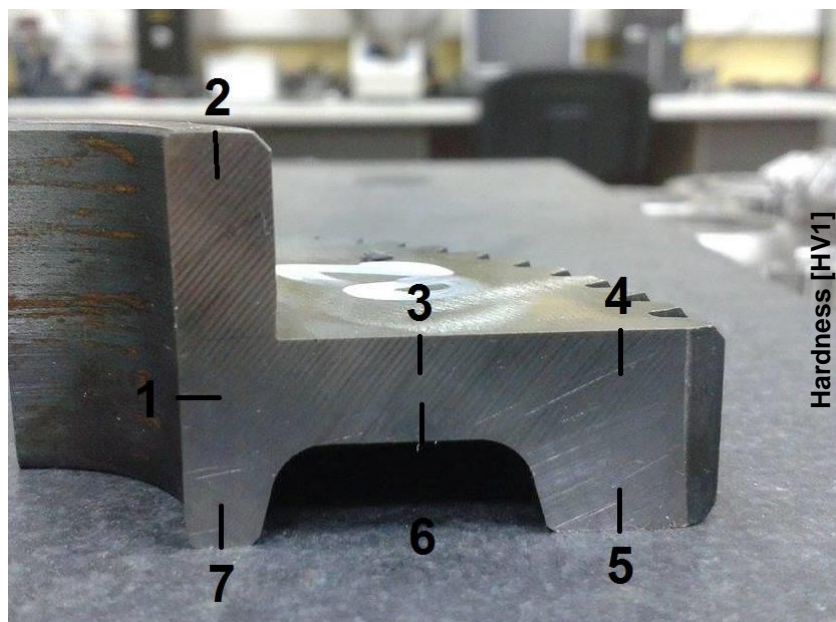


Gas stream control => cooling control => distortion control & reduction

Komora procesowa obróbki cieplno-chemicznej urządzenia *single-piece flow*



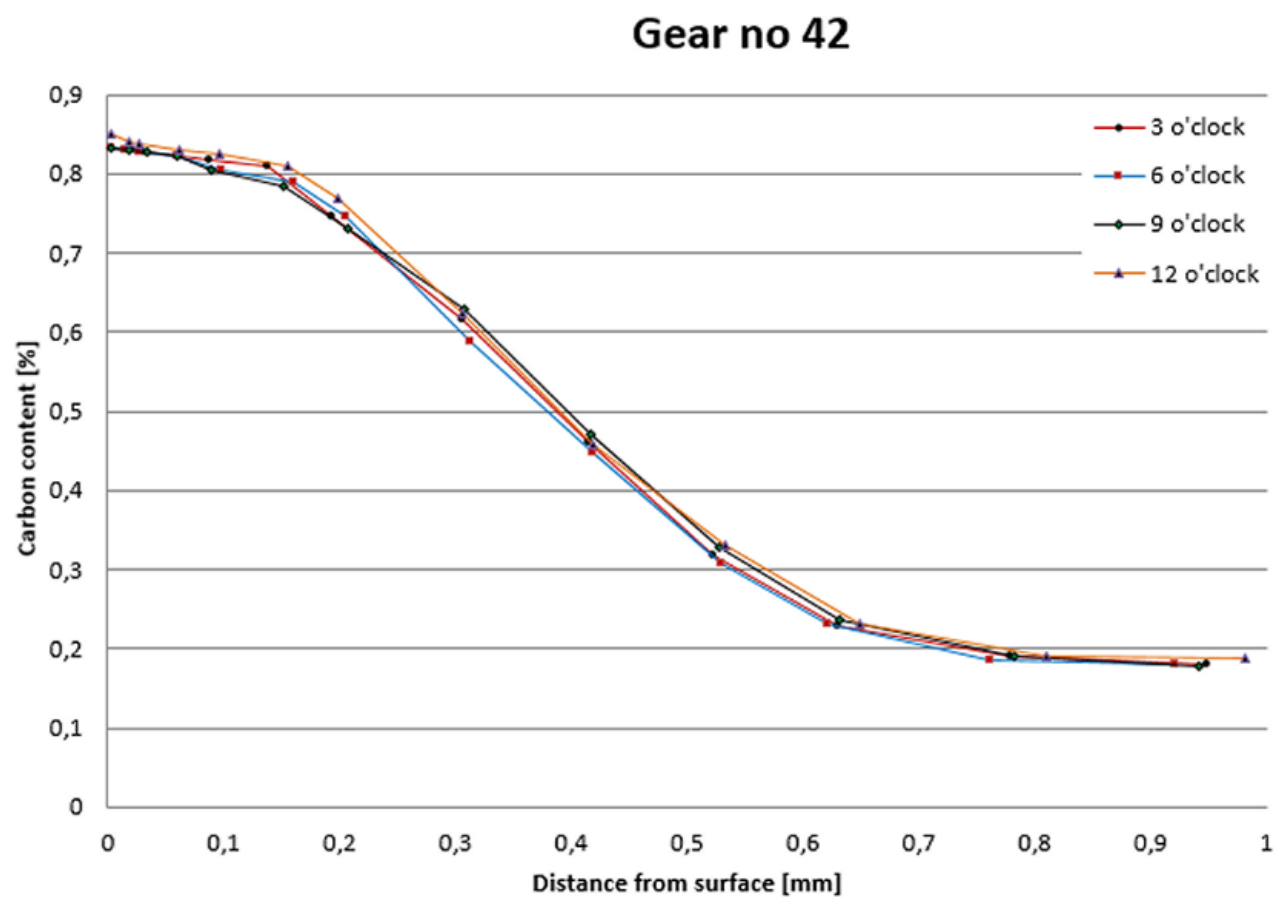
Wyniki badań jednorodności nawęglania



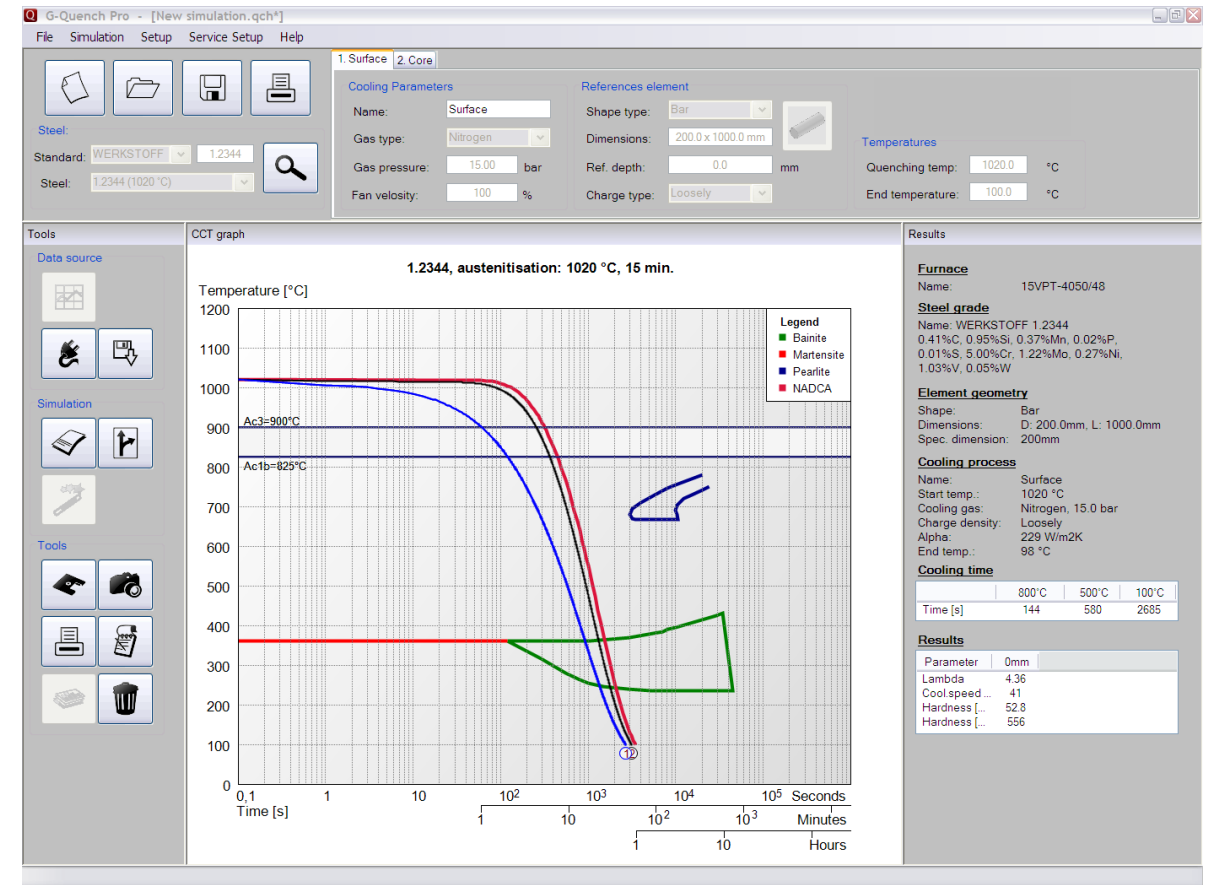
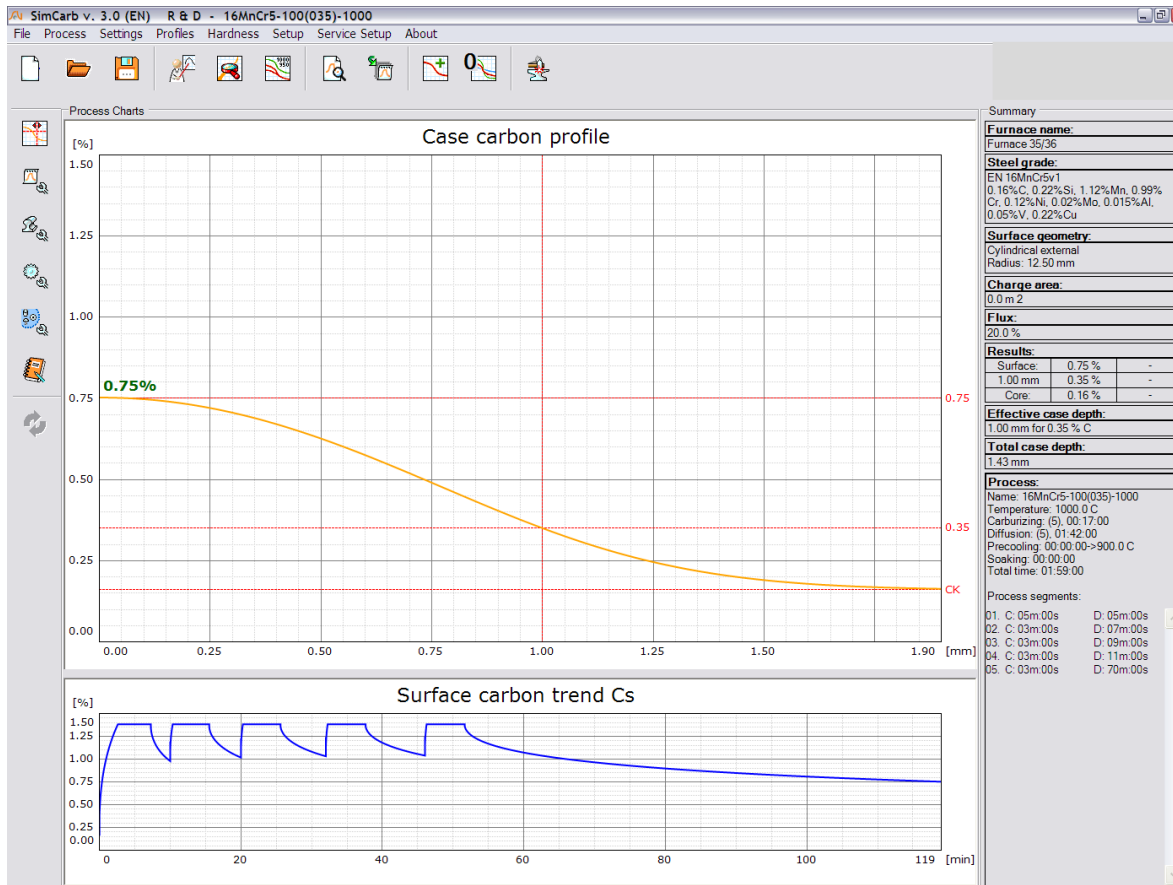
Badania:

- Twardość powierzchniowa
- Mikrostruktura zębów
- Profil mikrotwardości zębów
- Profil rozkładu stężenia węgla

Wyniki badań jednorodności nawęglania

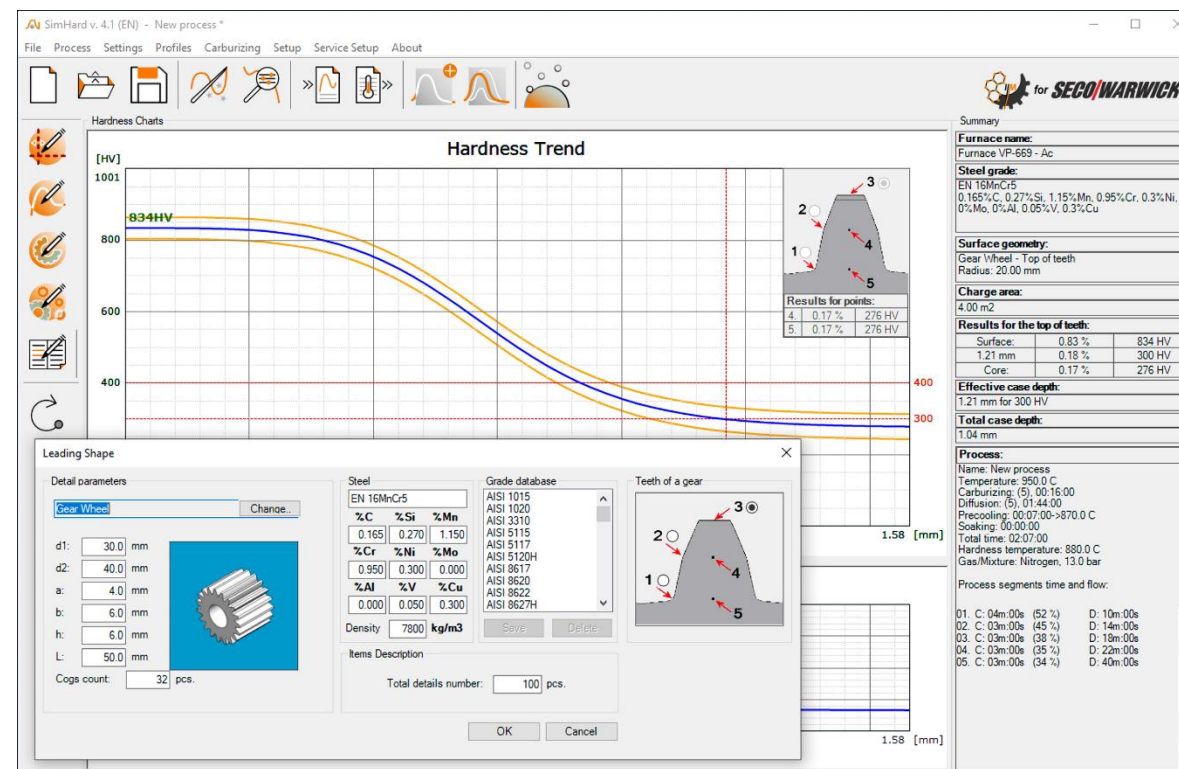
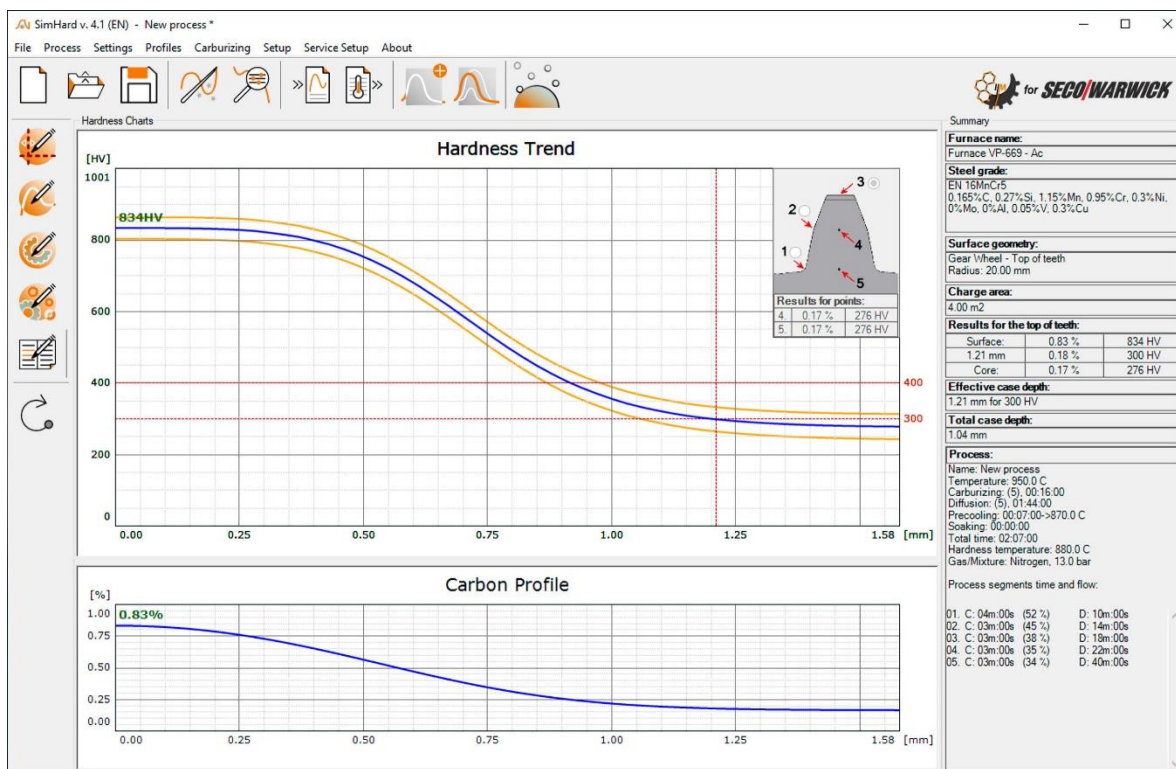


Narzędzia wspierające próżniową i gazową obróbkę cieplną



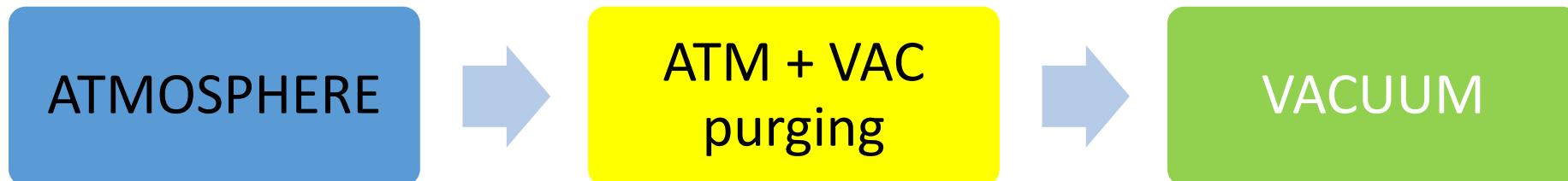
Narzędzia wspierające próżniową i gazową obróbkę cieplną

> 200 wdrożeń przemysłowych na świecie



Rozwój nowoczesnej obróbki cieplnej w produkcji masowej

Thermal Process



Quenching



Production flow



PAST

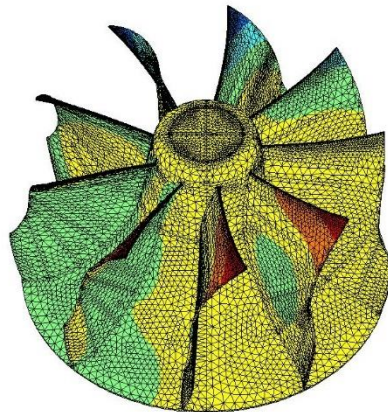
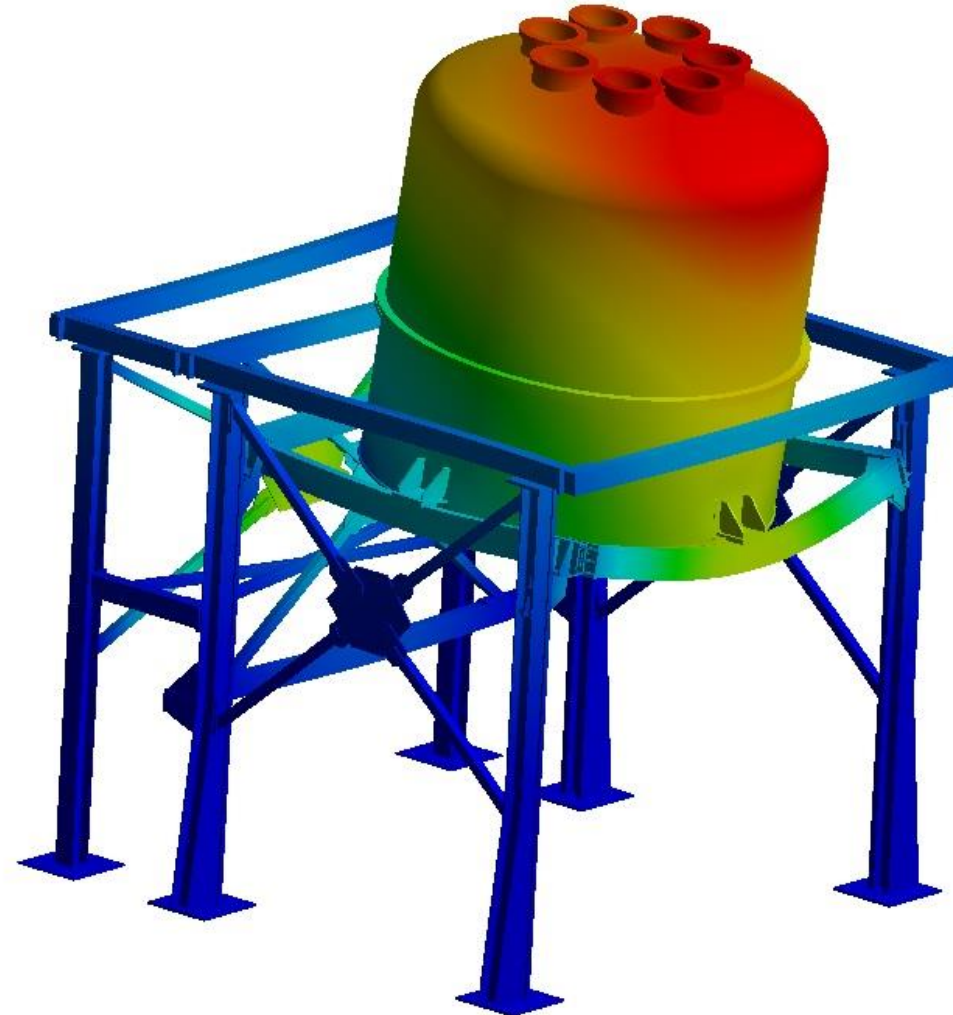
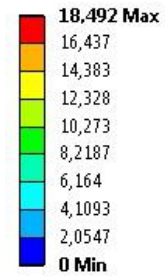
PRESENT

FUTURE




Analizy numeryczne FEM (Finite Element Analysis)

B: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1

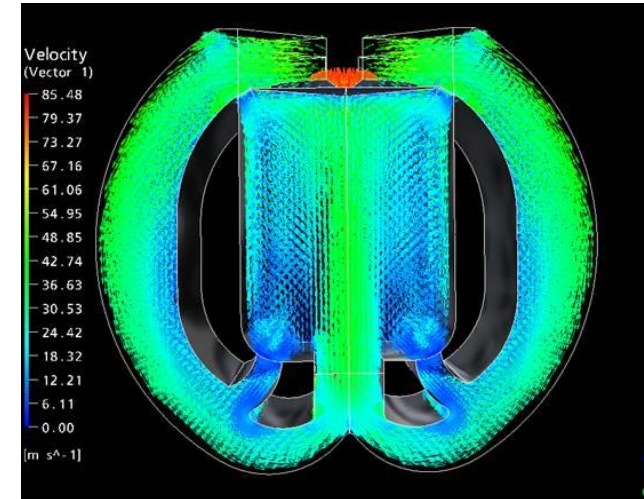
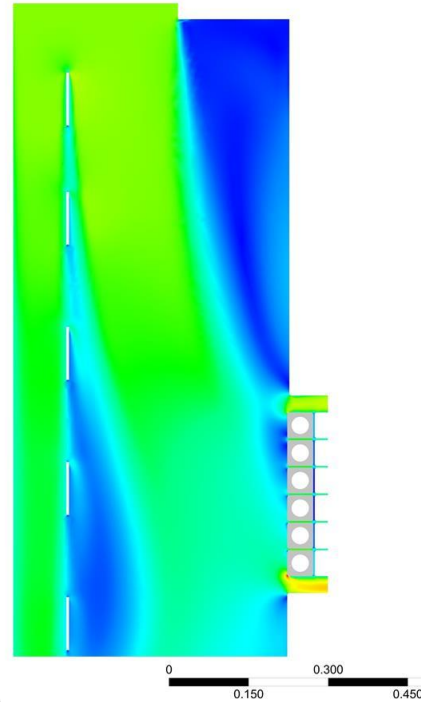
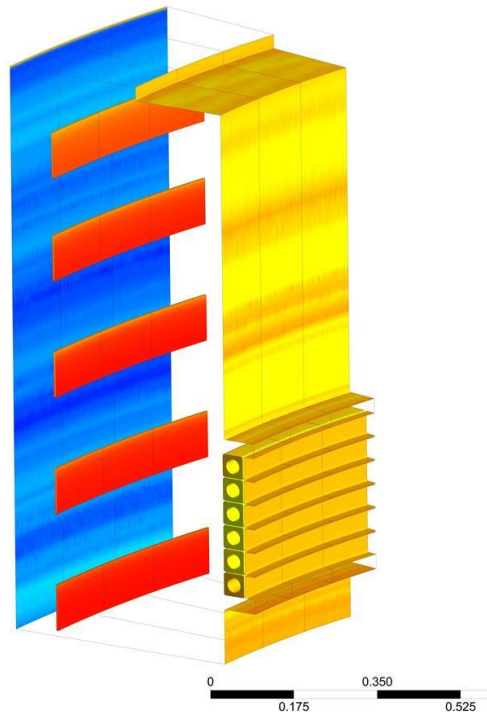


Displ Set, Step 1, Sub 1, -1,
Contour 1, Translation

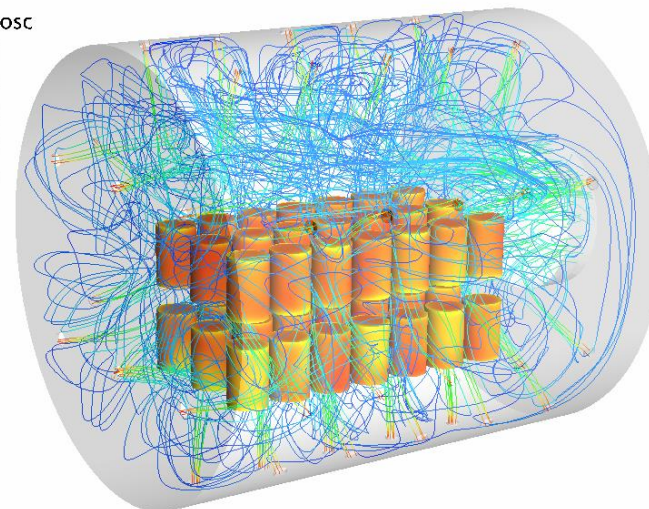


Obliczenia numeryczne CFD (Computational Fluid Dynamics)

Temperature
elementy
656.00
646.00
636.00
626.00
616.00
[C]



Prędkosc
150
139
129
118
107
96
86
75
64
54
43
32
21
11
0
[m s⁻¹]



Acknowledgments



**European
Funds**
Smart Growth

European Union
European Regional
Development Fund



Badania i publikacja zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu POIR.04.01.04-00-0087/15 pod tytułem: „Urządzenie do wysokowydajnej i precyzyjnej obróbki cieplnej z układem redukcji odkształceń hartowniczych do bezpośredniej aplikacji w łańcuchu potokowej produkcji elementów przekładni mechanicznych i łożysk”.

PODZIĘKOWANIE

/ Autorka dziękuje firmie
Seco/Warwick S.A. Polska,
producentowi urządzeń do obróbki cieplnej,
za udostępnienie materiałów.



Współczesne kierunki rozwoju obróbki cieplnej stopów żelaza

XI Webinarium Techniczne Akademii Inżynierskiej w Polsce

04 marca 2022



dr hab. inż. Emilia Wołowicz-Korecka, prof. PŁ
Politechnika Łódzka