

# 平辊压扁轧制圆钢丝工艺的研究动态

宋清华, 王伯健

(西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055)

**摘要** 主要研究了圆钢丝的平辊压扁轧制成型工艺,重点探讨了钢丝压扁轧制的变形特点,分析了钢丝在压扁轧制中的变形规律和压力分布情况,总结了目前用于计算宽展的公式。同时,阐述了国内外钢丝平辊压扁轧制工艺的研究动态,指出了今后钢丝压扁轧制成型工艺研究重点。

**关键词** 扁钢丝 平辊压扁轧制 横向宽展 宽厚比

## The Study Trends of Circular Steel Wire Flat Rolling Process

SONG Qinghua, WANG Bojian

(School of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

**Abstract** The circular wire flat rolling process is mainly studied in the paper. The deformation traits in flat rolling process are discussed, and then the deformation laws and pressure distribution in the process are analyzed. Several current lateral spread formulas are summarized. At the same time, the study trends of circular wire flat rolling process in China and abroad are set forth. Then the study directions in future for wire flat rolling process are pointed out in the end.

**Key words** flattened wire, flat rolling, lateral spread, thickness-width ratio

利用轧制方式将圆钢丝压扁,可获得大宽厚比扁平钢带,称为扁钢丝或超窄钢带。压扁钢丝有着广泛用途,如锯条、弹簧、活塞环、万吨压力机缠绕用高强度低松弛扁钢丝、航天航空制导系统和军工用合金扁钢丝、定时器发条、汽车雨刮器骨架及纺织行业大量使用的钢筘及钢片综等<sup>[1-3]</sup>。

扁钢丝主要生产方式有两种:一种是将经热轧或者冷轧后的宽钢带纵剪得到扁钢丝;另一种是将一定规格圆截面钢丝通过压扁轧制成型。目前,采用纵剪宽带钢生产超窄带钢的工艺比较普遍,所有生产带钢的企业都可以配备纵剪尺寸精确的纵剪机组生产扁钢丝,满足普通需求。但是,对于大宽厚比特窄钢带,特别是要求边部成圆形状的高精度扁钢丝,采用钢丝压扁工艺轧成型具有显著优点:(1)简化了扁钢丝的生产工艺,一次成型,可以获得大盘重,降低了生产成本;(2)钢丝压扁扁钢丝的边部是圆弧状,毛刺、裂纹等一般带钢常有的缺陷较少,在较大拉应力状态下,压扁钢丝不易出现裂纹等失效源;(3)经钢丝压扁轧制的扁钢丝具有较高的抗拉强度、塑性和深冲性能;(4)平直度较好,钢带尺寸精度高、表面质量高,经表面处理后,外形美观。

因此,利用钢丝压扁轧制工艺生产的扁钢丝比利用纵剪宽带钢得到的扁钢丝成本低、尺寸精确、综合性能更好,且能得到大盘重,具有更广泛的应用市场和技术研究前景。

目前,国内外研究平辊压扁轧制圆截面钢丝的资料非常少,没有形成统一完善的压扁轧制变形理论,更没有现成的压扁轧制宽展公式可以使用。平辊压扁轧制变形的宽展控制是决定压扁圆钢丝规格和精度的关键所在。本文通过作者的一些试验和实践生产,并结合目前国外最新的研究成果,对平辊压扁轧制变形提出一些需要继续深入研究的问题,以供广大学者参考。

### 1 压扁轧制圆钢丝成型工艺

压扁轧制圆钢丝成型工艺是采用半成品的规格钢丝,经

由带有张力控制系统的2~5平辊联轧机组连续轧制,将圆钢丝轧制成扁钢丝的生产工艺。轧制的最大特点是变形钢丝在和轧辊接触的面上只受径向压力,而不受纵向拉力。因此,钢丝变形量大、塑性好,可大大提高钢丝的一次变形率。图1是三机架连轧扁丝生产线将圆钢丝轧制成两边是自由圆弧的扁钢丝变形示意图。

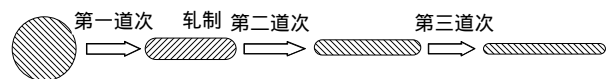


图1 圆钢丝轧制变形前后横截面示意图

#### 1.1 压扁轧制成型工艺示意图

压扁轧制采用上下同为主动工作辊的二辊平轧机。压扁轧制第一道次压下量较大,使得最初的圆形截面变成中间平侧边鼓的形状,如图1和图2所示。随轧制道次的增多,平面应变程度不断增加。因此,第一道次是横向宽展发生的关键道次,决定了轧制状态的建立。由于轧制过程中钢丝直径和轧辊间隙恒定,所以可观察到不同张力对横向宽展的影响。关于该压扁轧制试验的建立细节和结果可见文献[2],很容易观察到增加前后张力(如图2所示)可减小横向上的宽展变形。



图2 圆钢丝压扁轧制变形示意图

#### 1.2 钢丝压扁轧制的变形特点及金属流动规律

钢丝压扁轧制变形时,轧辊与钢丝非同时性接触,变形

区形状沿轧件宽度方向上是变化的，金属沿纵向及横向流动不均匀。接触面区域从线接触到面接触，并且逐渐增大。图 3 是利用网格法描述钢丝横截面金属流动规律的示意图。

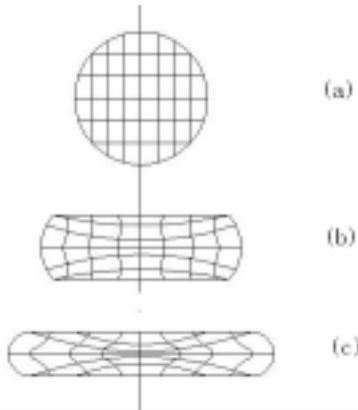


图 3 钢丝横截面材料流动示意图

从图 3 网格的变化可以看出，钢丝压扁过程中钢丝边缘部分金属变形比较小。其原因是：钢丝在压扁轧制过程中由于摩擦作用，接触区是难变形区，变形小，中心部分是易变形区，边部是自由变形区，无约束，而金属流动的趋势是向阻力最小的方向流动，因此，心部的变形朝着横向宽展的方向流动，导致钢丝边缘部分的变形量比较小。宽展主要归功于中心部和边部金属的流动。

M. Kazeminezhad 和 A. Karimi Taheri 利用平面应变的有限薄片单元分析法(the finite and slab element method)<sup>[3]</sup>,分析了平辊压扁轧制时轧件内部金属的流动规律，以及轧件内部金属的剪切变形带，如图 4~6 所示。



图 4 平辊压扁轧制成型工艺的有限单元片分析法

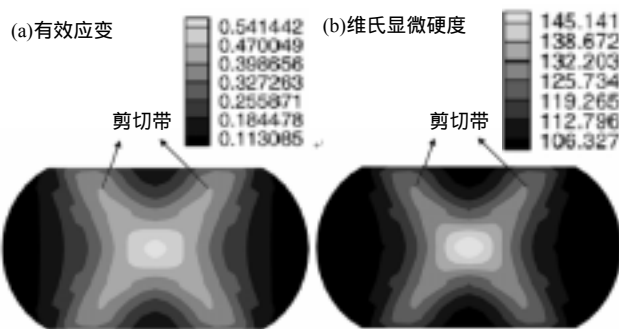


图 5 压下率=0.35 扁平钢丝横截面上的有效应变场(a)和压下率=0.35 扁平钢丝横截面上的显微硬度分布(b)

利用该分析方法，采用不同的压下量从速度场计算出压扁轧制变形时的有效应变场，如图 5(a)和图 6 所示。为了证实计算结果的有效性，笔者测量了压扁钢丝横截面的维氏显微硬度的分布情况，如图 5(b)所示。与图 5(a)相比较的结果表明，显微硬度的分布印证了计算出的有效应变场的分布。

理论计算和试验结果均表明，圆截面钢丝压扁轧制时，最大的有效应变处在轧件中心，而最小的有效应变处在轧件边部。

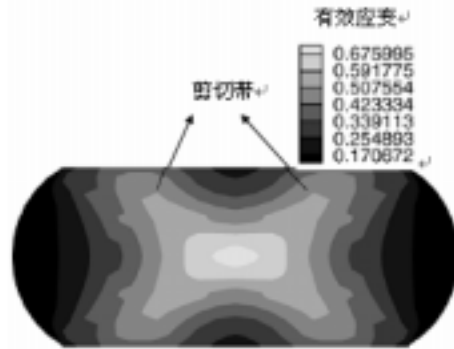


图 6 压下率=0.44 扁平钢丝横截面上的有效应变场

从图 5 和图 6 可以看出，由于压扁轧制时变形和金属流动不均匀性，压扁钢丝的横截面上有效应变场呈现出 2 条明显的最大有效应变带。压扁钢丝横截面的金相组织图 7 证实了这 2 条最大有效应变带的存在，呈“X”状，印证了有限元的计算结果。应变带的存在是由于在压扁轧制变形时，钢丝不同部位发生塑性变形程度不同及金属流动的不均匀性造成的。

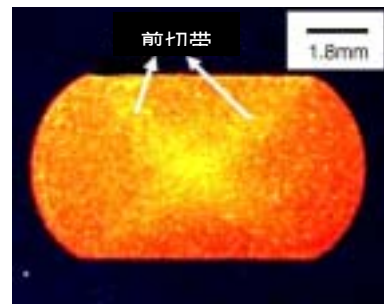


图 7 压下率=0.35 扁平钢丝横截面的金相图

### 1.3 钢丝压扁轧制的压力分布情况

B. Carlsson 和 J. Lagergren<sup>[1,2]</sup>采用有限元模型对钢丝轧制第一道次的接触区进行探查，发现该处压力分布与预期设想不同，可观察到最大压力不在接触表面的中心，而在接触区的入口处，呈马蹄状，如图 8 所示。

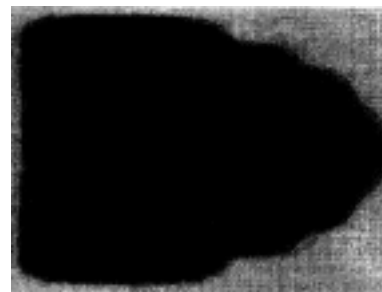


图 8 接触区的压力分布图

这种压力分布现象在忽略摩擦系数增大时可明显观察到。目前，已经建立了一种用于解释润滑剂相对于宽展独立性的理论，在 B. Carlsson 和 J. Lagergren 的研究结果中得到证实。由于压力在接触区的入口达到很高程度（由于钢丝平辊轧制属非同时接触压下，该压力无法精确测量，但根据第一

道次压下量可超过 50%，可推算该压力很高），压力峰呈犁状，促使润滑剂可能向边界流动，导致几乎没有润滑剂进入接触区，因此润滑剂的影响可以忽略<sup>[1]</sup>。

压扁轧制时的钢丝形态是不断变化的，接触面大致成椭圆形。钢丝头部首先进入接触区，如图 9 中的 A 部分。当这部分材料开始变形时，钢丝周边部分仍在弹性范围内，会抵抗变形。在这种抵抗行为的作用下，名义压力得以建立，导致接触区的压力显著增加。当变形继续进行，钢丝大部分屈服，弹性部分的抵抗作用降低，如图 9 中的 B 部分，此时弹性变形结束时的较小影响使材料有可能向宽展方向流动，压力降低，此时摩擦峰开始形成，如图 9 的 C 部分，压力峰也形成。这种变形也可以解释如下：在图 9 的 1 区，金属的流动主要向宽展方向；而在 2 区，金属同时向边部和纵向方向流动，使得中心处正常的摩擦峰与边缘入口处马蹄状压力相互结合。

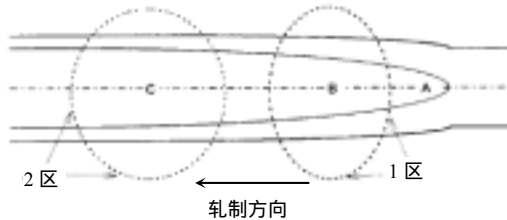


图 9 俯视图观察到的变形钢丝形态示意图

比较接触区的压力分布和宽展分布，可观察到压力下降的区域对应于横向宽展的最大区，即接触压力的大小是与宽展变形率同时变化的。目前通过试验证实这种压力分布形式强烈地影响着轧制过程中钢丝的横向宽展，同时也影响着轧辊的磨损情况。

## 2 钢丝压扁轧制宽展的计算公式

平辊压扁轧制变形的宽展控制是决定扁钢丝规格和高精度的关键所在。影响宽展的因素较多，如轧制条件、摩擦系数、压下量、轧辊半径、轧制道次、前后张力和钢材的原始状态等。

### 2.1 常用宽展公式

关于钢丝压扁轧制宽展的计算也没有一致的标准。目前，常用的宽展公式仍采用板材轧制时的宽展规律，主要有：

(a) E.Sibel 宽展量公式：

$$\Delta B = C \frac{\Delta h}{H} \sqrt{R \cdot \Delta H} \quad (1)$$

式(1)中：C 为钢材的宽展系数， $\Delta h$  为压下量，mm；H、h 为钢材轧压前、后的厚度(mm)；R 为轧辊半径(mm)。

(b) C. 古布金宽展量公式：

$$\Delta B = \left(1 + \frac{\Delta h}{H}\right) \left(\mu \sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2}\right) \frac{\Delta h}{H} \quad (2)$$

式(2)中： $\mu$  为摩擦系数。

(c) C. 古布金宽展量公式的修正式：

$$\Delta B = \left(1 + \frac{\Delta h}{H}\right) \left(\mu \sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2}\right) \frac{\Delta h}{H} + \Delta B_i \quad (3)$$

式(2)中： $\Delta B_i$  为与钢材原始状态和轧压条件（前后张力、轧

制道次、变形速度等）有关的一个修正量(mm)。

一般认为<sup>[4]</sup>：计算钢丝压扁第一道次宽展量用 E.Sibel 宽展量公式，该公式不仅考虑了变形区的形状、道次压下量对宽展的影响，而且将其它相关因素对宽展的影响合并为宽展系数的函数，计算结果精度较高。第二道次和第三道次的宽展量可以用 C. 古布金宽展量公式及其修正式计算。林吉曙也分析了 E.Sibel 和 C. 古布金公式在计算钢丝压扁轧制宽展时的应用，认为 C. 古布金宽展量公式的修正式(式(3)) 适于扁钢丝的生产<sup>[4]</sup>。由于板材与圆丝轧扁的条件存在差异，在实际应用过程中钢丝的宽展与计算结果差别较大。

### 2.2 关于宽展公式的研究新进展

M. Kazeminezhad 等研究了同规格( 5.5 mm)不同材质钢丝利用平辊轧制后的宽展规律、轧制压下量与轧制接触区宽度(即图 2 中参数 b)的关系，以及材质和轧制速度对接触区宽度和宽展的影响，得到以下结果<sup>[5-7]</sup>。

(1) 平辊轧制接触区的宽度与轧制压下量的平方根成正比，即：

$$b = \sqrt{2h_0 \cdot \Delta h} \quad (4)$$

M. Kazeminezhad 等认为在压扁轧制过程中，图 10 中的虚线(即图 10(a)中的钢丝直径)长度始终保持不变，即  $CC' = DD' = H = d_0$ ，然后通过数学推导，得出压扁轧制接触区宽度  $b = \sqrt{2h_0 \cdot \Delta h}$ 。

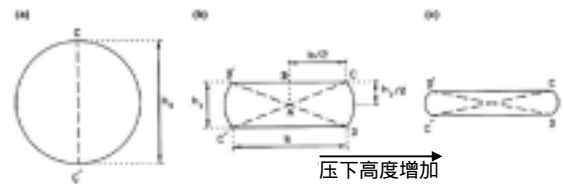


图 10 钢丝压扁轧制的横截面尺寸参数变化示意图

(2) 润滑剂、钢丝材质和轧制速度对接触区宽度和宽展量的影响可以忽略，钢丝的宽展量取决于钢丝原始直径和轧制压下量。

(3) 根据理论推导和试验数据拟合，得到宽展公式(5)：

$$\frac{W_1}{W_0} = 1.02 \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{0.45} \quad (5)$$

$$\ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right) = 0.02 \left(\frac{W_0}{\sqrt{R \cdot \Delta h}}\right)^{-2.1} \quad (6)$$

为了验证宽展公式(5)和(6)的精确度，作者分别对 4 种不同钢种、尺寸和原始状态的钢丝进行了压扁轧制试验，然后将相关数据分别代入公式(5)和(6)，得出计算宽展值和见表 1。从表 1 中数据可以看出，公式(5)和(6)计算第一道次轧制的宽展值是比较精确的，最小误差分别可达到 0.03% 和 0.62%，但计算的第二道次和第三道次后的宽展值，误差较大，且呈现上升趋势，可见这些公式仍存在一定的局限性，有相应的适用条件。宽展公式(5)和(6)的推导和拟合主要是考虑了单道次压扁轧制特性，但当进行多道次连续轧制时，该理论忽略一些因素的影响，如压下量和道次的分配、摩擦系数影响等。M. Kazeminezhad 和 B. Carlsson 均认为润滑剂的影响可以忽略。在单道次压扁轧制时，润滑剂的影响不是很明显，但当进行连续轧制时，尤其是在第一道次非均匀变形

的压扁轧制以后，道次可以近似为薄板轧制，此时润滑剂的作用就不可以忽略，而且对宽展影响非常明显。笔者实际试验中采用循环皂化液润滑剂，喷射于轧制两轧辊之间，有皂化液时明显比无皂化液时宽展量小。由此可以得出结论，M. Kazeminezhad 宽展公式不适合连轧机组压扁轧制总宽展量的计算，仅限于对单道次获第一道次的宽展量进行预测。

作者还研究发现，同规格硬态和软态高碳钢丝和不锈钢丝，在轧辊半径、轧制速度、轧制前后张力不变的情况下，其宽展系数差别较大。钢丝轧前的显微组织状态、硬度及压扁轧制时的摩擦系数对压扁轧制具有决定性影响。另外，轧制速度和前、后张力，以及轧辊材质和光洁度均对宽展较明显的影响。

表 1 对 M. Kazeminezhad 宽展公式的校核

钢丝种类	产品规格 mm×mm	轧制道次 N	原始	轧后	原始	轧后	宽展计 算值 W mm	百分 误差 %	宽展计	百分 误差 %
			厚度 h <sub>0</sub> mm	厚度 h <sub>1</sub> mm	宽度 W <sub>0</sub> mm	宽度 W <sub>1</sub> mm			算值 W mm	
Φ2.5mm 72B 球化退火 钢丝	0.32×5.67	1	Φ2.5	1.033	2.500	3.730	3.795	1.76	3.753	0.62
		2	Φ2.5	0.522	2.500	4.910	5.160	5.09	4.360	11.2
		3	Φ2.5	0.323	2.500	5.671	6.404	12.9	4.624	18.5
Φ4.8mm 3Cr13 再结晶 退火钢丝	0.58×9.62	1	Φ4.8	1.90	4.800	6.88	7.430	7.99	5.929	13.8
		2	Φ4.8	1.00	4.800	8.54	9.917	16.1	6.355	25.6
		3	Φ4.8	0.58	4.800	9.62	12.67	31.7	6.565	31.7
Φ2.5mm 2Cr13 轻拉态 钢丝	0.32×5.78	1	Φ2.5	1.02	2.500	3.86	3.817	1.11	3.768	2.39
		2	Φ2.5	0.63	2.500	4.67	4.741	1.53	4.223	9.57
		3	Φ2.5	0.32	2.500	5.78	6.431	11.2	4.629	19.9
Φ4.0mm 固溶 处理 304 奥氏 体不锈钢丝	0.64× 8.12	1	Φ4.0	1.70	4.000	5.92	5.996	1.28	5.099	13.8
		2	Φ4.0	1.06	4.000	7.06	7.417	5.06	5.477	22.4
		3	Φ4.0	0.64	4.000	8.12	9.307	14.6	5.742	29.3
Φ3.0mm 轻拉 态 304 奥氏体 不锈钢丝	0.80×5.90	1	Φ3.0	1.70	3.000	3.95	3.951	0.03	3.829	3.05
		2	Φ3.0	1.00	3.000	5.10	5.017	1.63	4.403	13.7
		3	Φ3.0	0.80	3.000	5.90	5.546	5.99	4.584	22.3

## 4 结论及建议

### 4.1 结论

(1) 国外学者利用有限元分析了压扁轧制时变形区的金属流动和变形特点，探讨了压扁钢丝有效应变场的分布情况，结合显微硬度试验和金相观测证实了压扁钢丝中剪切带的存在，为研究轧制时宽展变化规律提供了必要的理论基础。

(2) B. Carlsson 宽展理论也仅考虑了单道次或第一道次压扁轧制的压力分布和金属流动规律，此理论也不适用于后续道次的宽展变形。

(3) M. Kazeminezhad 通过有限元模型，结合理论推导及试验数据拟合得到了计算压扁轧制接触区宽度和宽展量的计算公式：

$$b = \sqrt{2h_0 \cdot \Delta h}$$

$$\frac{W_1}{W_0} = 1.02 \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{0.45} \text{ 和 } \ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right) = 0.02 \left(\frac{W_0}{\sqrt{R \cdot \Delta h}}\right)^{-2.1}$$

(4) 作者通过试验数据验证，M. Kazeminezhad 宽展公式在计算单道次或第一道次压扁轧制宽展量时，精度较高，但用于计算多道次轧制宽展量，误差很大，且宽展公式(5)

计算精度高于公式(6)。

(5) 由于第一道次后续的轧制可近似为薄板轧制，因此可以采用 C. 古布金宽展修正公式：

$$\Delta B = \left(1 + \frac{\Delta h}{H}\right) \left(\mu \sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2}\right) \frac{\Delta h}{H} + \Delta B_i$$

计算。该公式与 M. Kazeminezhad 宽展式(5)结合，计算得宽展量的精度较高。

### 4.2 今后的研究重点

由于影响宽展的因素有材质状态、轧辊直径、相对压下量、轧制道次、润滑情况、前后张力及轧制速度等，因此，压扁轧制时的宽展是这些因素综合作用的结果。其中材质状态、轧辊直径、轧制道次为相对不可变因素，而较容易控制的是前后张力和轧制速度，所以，笔者试图从以下几个方面继续探索宽展规律：

(1) 结合试验数据，修正已有 M. Kazeminezhad 宽展公式  $\frac{W_1}{W_0} = 1.02 \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{0.45}$  和  $\ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right) = 0.02 \left(\frac{W_0}{\sqrt{R \cdot \Delta h}}\right)^{-2.1}$ ，提高其计算精度，或者继续寻求更精确的宽展计算公式。

(2) 结合有限元分析模型，分析第一道次轧制后的宽展变形规律，压扁钢丝中的硬度分布对后续轧制宽展的影响。

(3) 探讨摩擦系数对第一道次轧制后宽展变化的影响。目前的研究成果可以初步表明, 润滑剂和轧制速度对钢丝第一道次压扁轧制的宽展量影响不大, 但根据试验数据分析, 在后续的轧制中, 这两个因素起重要作用。

由于影响宽展的因素是非常复杂的, 在不同条件下不同因素占主导作用。只有找出这些因素与宽展之间的变化规律和相互之间的制约关系, 结合生产实际, 不断调试, 才能达到生产出多规格、高精度扁钢丝的目的。

### 参考文献

- 1 Carlsson B. The contact pressure distribution in flat rolling of wire. *J Mater Proc Techn*, 1998 ,( 73 ): 1
- 2 Carlsson B , Lagergren J. The deformation of drawn wire in flat rolling , ESDA 96 , Third Biennial Joint Conference on Engineering Systems , Design and Analysis ,Nol.3 ,ASME , New York , 1996.175
- 3 Kazeminezhad M , Karimi Taheri A. The prediction of macroscopic shear bands in flat rolled wire using the finite and slab element method. *Mater Lett* , 2006
- 4 林吉曙. 纺织器材用钢材轧制和压扁宽展研究. *纺织器材* , 2001 , 28 ( 1 ): 23
- 5 Kazeminezhad M , Karimi Taheri A. A theoretical and experimental investigation on wire flat rolling process using deformation pattern. *Mater Des* , 2005 ,( 26 ): 99
- 6 Kazeminezhad M , Karimi Taheri A. An experimental investigation on the deformation behavior during wire flat rolling process. *J Mater Proce Techn* , 2005 ,( 160 ): 313
- 7 Kazeminezhad M , Karimi Taheri A. Calculation of the rolling pressure distribution and force in wire flat rolling process. *J Mater Proc Techn* , 2006 ,( 171 ): 253